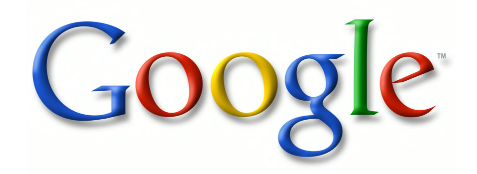






HILFSBUCH

FÜR DIE

ELEKTROTECHNIK

HERAUSGEGEBEN

VON

KARL STRECKER

NEUNTE AUFLAGE



Hilfsbuch
für die
Elektrotechnik

Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen

bearbeitet und herausgegeben

von

Dr. Karl Strecker

Neunte, umgearbeitete Auflage

Mit 552 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1921

Aus dem Vorwort zur achten Auflage.

Bei der raschen Entwicklung der Elektrotechnik erfordert eine neue Auflage dieses Hilfsbuchs, welche die beiden letzten Male nach je sechs Jahren erforderlich war, stets eine sehr umfassende Umarbeitung. Es sind nur wenige kleine Teile geblieben, wie sie waren, das meiste ist gründlich durchgearbeitet und vielfach geändert, manche Abschnitte sind ganz neu bearbeitet worden.

Besonders waren die Arbeiten des Ausschusess für Einheiten und Formelgrößen zu berücksichtigen. Der Beschluß, alle Leistungen in Kilowatt auszudrücken, die Pferdestärke nicht mehr zu benutzen, ist durchgeführt worden. Zur Erleichterung der Umgewöhnung ist eine Rechentabelle eingefügt worden.

Der elektophysikalische Teil ist gänzlich neu bearbeitet; es wurde dabei von der Vektorenrechnung Gebrauch gemacht und deshalb ein besonderes Kapitel über Vektorenrechnung gebracht.

In der Meßkunde ist ist vieles Veraltete gestrichen, Neues eingefügt und das Ganze umgearbeitet worden.

Der Abschnitt über Dynamomaschinen, der erst für die vorige Auflage neu bearbeitet worden war, erforderte dennoch eine umfassende Durcharbeitung. Die Beispiele ausgeführter Maschinen und Transformatoren sind diesmal nach einem anderen Gesichtspunkt ausgewählt worden wie bei den früheren Auflagen. An Stelle des bisherigen Strebens nach einer gewissen Vollständigkeit trat diesmal eine sorgfältige Auswahl. Die Abbildungen, bei den größeren Maschinen von Seitengröße, lassen nun viele Einzelheiten erkennen; die Maßangaben beziehen sich nur noch auf die besonders dargestellten Beispiele.

In dem Abschnitt über galvanische Elemente ist der alkalische Sammler neu aufgenommen worden.

Der Abschnitt über das elektrische Kraftwerk läßt, was schon in einer Besprechung der vorigen Auflage gerügt wurde, ausführliche Mitteilungen über Antriebsmaschinen, Wasserwerke und dergl. vermissen. Wollte man den Umfang und Preis des Buches nicht ins Ungemessene steigern, so mußte man sich im Stoff beschränken. Das Hilfsbuch für die Elektrotechnik strebt nach einer gewissen Vollständigkeit auf dem Gebiete der Elektrotechnik; es sollten daher die Grenzen dieses Gebietes nicht zu weit gesteckt und besonders die Ausdehnung auf das allgemein maschinentechnische vermieden werden.

Der Abschnitt über Leitung und Verteilung ist gleichfalls gründlich umgearbeitet worden. Auch hier besteht eine Lücke, die dem Buche schon einmal vorgeworfen worden ist: der Mangel an Schaltbildern für Sammleranlagen. Es war die Rücksicht auf den einzuhaltenden Raum, die dazu nötigte, auf das allgemein verbreitete und jedem zugängliche Schaltbuch der Akkumulatorenfabrik zu verweisen.

Bei der elektrischen Beleuchtung waren besonders die neueren Glühlampen zu berücksichtigen.

Am gründlichsten ist der Abschnitt Elektrische Kraftübertragung umgestaltet worden; es handelt sich um eine ganz neue Arbeit, da das Alte unzulänglich war: elektrischer Antrieb in Berg-, Hütten- und Walzwerken, bei Hebezeugen, im Fabrikbetrieb, Verwendung in der Landwirtschaft (Überlandzentralen) und als umfangreichster Teil die elektrischen Bahnen.

Auch die nun folgenden kleineren Abschnitte, wie der größere Abschnitt Elektrochemie sind gründlich durchgearbeitet und erneuert worden.

Der Abschnitt über drahtlose Telegraphie bedurfte natürlich gleichfalls einer weitgehenden Erneuerung.

In allen Abschnitten ist auf reichliche Literaturangaben besonderer Wert gelegt worden.

Berlin, Oktober 1912.

Vorwort zur neunten Auflage.

Auch diese Auflage stellt eine sorgfältige Durcharbeitung der vorhergehenden dar. Besonders wurde vieles ausgeschieden, was in Anbetracht der großen Kosten für Satz und Papier für entbehrlich gehalten wurde.

Aus dem gleichen Grunde ist aber auch weiter gekürzt worden. Da das Hilfsbuch hauptsächlich in den Kreisen des Starkstroms benutzt wird, schien es richtig, die hierfür weniger in Betracht kommende Schwachstromtechnik bei dieser Auflage völlig wegzulassen. Zugleich wurden die Abschnitte über primäre Elemente, über elektrische Zündung und über Gebäudeblitzableiter ausgeschieden. Ebenso wurde auch der Abschnitt Elektrochemie wesentlich gekürzt. Auch der Anhang wurde stark gekürzt, indem von den dort angeführten Gesetzen Verordnungen usw. kaum mehr als Titel und Stelle der Veröffentlichung mitgeteilt wird. Durch einfaches Weglassen wurde der Umfang des Buches um mehr als 200 Seiten, durch Kürzung um 60 Seiten, zusammen um 285 Seiten verringert; ohne diese Maßnahmen wäre der Preis des Buches noch um etwa die Hälfte höher geworden.

Für die Bearbeitung waren außer der Rücksicht auf kurze Fassung, die zu einer Vermehrung der Literaturangaben geführt hat, dieselben Gesichtspunkte maßgebend, wie für die vorhergehende Auflage. Alle Abschnitte ohne Ausnahme sind stark durchgearbeitet, umgearbeitet oder gar neu bearbeitet worden. Der physikalisch-elektrotechnische Teil (S. 39 bis 100) ist durch zahlreiche wichtige Angaben bereichert worden.

Auch bei dieser Auflage haben mich die elektrotechnischen Firmen in entgegenkommender Weise bei der Beschaffung von Unterlagen unterstützt, wofür ich hier verbindlichst danke.

Berlin, Oktober 1920.

Strecker.



Verzeichnis der Mitarbeiter

und der von ihnen bearbeiteten Abschnitte.

Bahl, J., Dipl-Ing., Oberingenieur, Berlin (Siemens-Schuckertwerke). (841) bis (853).

Benischke, G., Professor Dr., Charlottenburg (Technische Hochschule). (950) bis (966).

Bloch, L., Dr. Ing., Berlin (Osram-Versuchsstelle). (250)—(254).

Büttner, M., Dr., Berlin (Akkumulatorenfabrik Akt.-Ges.). (269)—(272), (578)—(600), (736)—(741).

Döry, J., Dr., stellv. Direktor, Chemnitz (Pöge-El.-Akt.-Ges.). (777)—(825).

Ely, O., Direktor, Nürnberg (Städt. Elektrizitätswerk). (615)—(623), (666) bis (680).

Engelhardt, V., Prof., Direktor, Berlin (Siemens & Halske A.-G., Gesellschaft für Elektrostahlanlagen m. b. H.). (854)—(923).

Görges, H., Geh. Hofrat, Prof. Dr. Ing., Dresden (Technische Hochschule). (300)—(577).

Gumlich, E., Geh. Regierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg (Phys.-Techn. Reichsanstalt). (23)—(36), (217)—(226).

Halbertsma, N. A., Dr. Ing., Privatdozent, Frankfurt a. M. (Dr.-Ing. Schneider & Co.). (273)—(300), (720)—(729).

Jaeger, W., Geh. Reg.-Rat Prof. Dr., Charlottenburg (Phys.-Techn. Reichsanstalt). (117)—(138), (142), (143), (157)—(165).

Kiebitz, Fr., Prof. Dr., Ober-Postrat, Berlin (Telegraphentechn. Reichsamt). (924)—(946).

Lux, H., Dr., Ingenieur, Berlin. (730)—(735).

Orlich, E., Geh. Regierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg (Technische Hochschule). (139)—(141), (144)—(156), (166)—(216), (227)—(249), (259)—(268).

Petri, A., Direktor, Belgard a. d. Persante (Überlandzentrale). (767)—(776).

Philippi, W., Prof., Direktor, Berlin (Siemens-Schuckertwerke). (742)—(766).

Sauer, J., Oberingenieur, Berlin (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft). (833) bis (840).

Schendell, G., Direktor, Stolp i. Pom. (Kraftwerke Glambocksee G. m. b. H.). (601)—(614), (660—(665), (681)—(692).

Schulz, W., Oberingenieur, Frankfurt a. M. (Prometheus). (826)—(832).

v. **Steinwehr**, H., Prof. Dr., Charlottenburg (Phys.-Techn. Reichsanstalt). (64) bis (76).

Süchting, Fr., Professor, Clausthal (Bergakademie). (624)—(652).

Wagner, K. W., Prof. Dr., Direktor, Berlin (Telegraphentechn. Reichsamt). (7), (8), (37)—(63), (77)—(116).

Wedding, W., Geh. Regierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg (Technische Hochschule). (693)—(719).

Zipp, H., Prof., Cöthen i. Anhalt (Friedrichs-Polytechnikum). (653)—(659).

Der Herausgeber (1)—(6), (9)—(22), (255)—(258), Anhang.

Inhaltsverzeichnis.

I. Teil. Allgemeine Hilfsmittel.

I. Abschnitt. Tabellen, Formeln, Bezeichnungen.

II. Abschnitt. Magnetismus und Elektrizität.

II. Teil. Meßkunde.

I. Abschnitt. Elektrische Meßverfahren und Meßvorrichtungen.

II. Abschnitt. Technische Messungen.

III. Abschnitt. Photometrie.

III. Teil. Elektrotechnik.

I. Abschnitt. Elektromagnete.

II. Abschnitt. Transformatoren.

III. Abschnitt. Dynamomaschinen.

IV. Abschnitt. Sammler oder Akkumulatoren.

V. Abschnitt. Das elektrische Kraftwerk.

VI. Abschnitt. Leitung und Verteilung.

VII. Abschnitt. Elektrische Beleuchtung.

VIII. Abschnitt. Elektrische Kraftübertragung.



IX. Abschnitt. Elektrische Wärmeerzeugung.

X. Abschnitt. Die Elektrizität auf Schiffen.

XI. Abschnitt. Elektrochemie.

XII. Abschnitt. Drahtlose Telegraphie und Telephonie.

XIII. Abschnitt. Leitungsblitzableiter oder Blitzschutzvorrichtungen und Spannungssicherungen.

Anhang.

Verbesserung:

Auf Seite 46, Zeile 24 ist einzufügen: »s. a. (951) Abb. 543 und 544.«

Erster Teil.

Allgemeine Hilfsmittel.

Erster Abschnitt.

Tabellen, Formeln, Bezeichnungen.

Mathematik, Mechanik, Wärme.

(1) Querschnitt und Gewicht von Eisen- und Kupferdrähten.

Durchmesser mm	Querschnitt mm²	Gewicht von 1000 m Eisen kg	Gewicht von 1000 m Kupfer kg	Durchmesser mm	Querschnitt mm²	Gewicht von 1000 m Eisen kg	Gewicht von 1000 m Kupfer kg
0,05	0,002	0,02	0,02	1,6	2,01	15,6	17,8
0,10	0,008	0,06	0,07	1,7	2,27	17,7	20,1
0,15	0,018	0,14	0,17	1,8	2,54	19,8	22,6
0,20	0,031	0,24	0,28	1,9	2,84	22,1	25,1
0,25	0,049	0,38	0,44	2,0	3,14	24,4	27,9
0,30	0,071	0,55	0,63	2,2	3,80	29,6	33,7
0,35	0,096	0,75	0,85	2,4	4,52	35,2	40,0
0,40	0,126	0,98	1,12	2,6	5,31	41,3	47,0
0,45	0,159	1,24	1,41	2,8	6,16	47,9	54,7
0,50	0,196	1,53	1,74	3,0	7,07	55,0	62,5
0,55	0,238	1,85	2,11	3,2	8,04	63	72
0,60	0,283	2,20	2,51	3,4	9,08	71	81
0,65	0,332	2,58	2,95	3,6	10,18	79	90
0,70	0,385	2,99	3,42	3,8	11,34	88	100
0,75	0,442	3,43	3,90	4,0	12,57	98	112
0,80	0,503	3,9	4,5	4,2	13,85	108	123
0,85	0,567	4,4	5,0	4,4	15,21	118	132
0,90	0,636	4,9	5,7	4,6	16,62	129	147
0,95	0,709	5,5	6,3	4,8	18,10	141	160
1,00	0,785	6,1	7,0	5,0	19,63	153	174
1,1	0,950	7,4	8,4	5,2	21,24	165	189
1,2	1,131	8,8	10,0	5,4	22,90	178	202
1,3	1,327	10,3	11,8	5,6	24,63	192	218
1,4	1,539	12,0	13,7	5,8	26,42	205	234
1,5	1,767	13,7	15,6	6,0	28,27	220	251

(2) Drahttafel für Drahtdurchmesser von 0,05 – 4,0 mm

Widerstand von

Draht-durchm.	Kupfer				Phosphor- und Siliziumbronze					
mm	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,025	0,030	0,04	0,05	0,06
0,05	8,15	8,66	9,17	9,68	10,19	12,73	15,3	20,4	25,5	30,6
0,10	2,04	2,16	2,29	2,42	2,55	3,18	3,8	5,1	6,4	7,6
0,15	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,41	1,70	2,26	2,83	3,4
0,20	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,80	0,95	1,27	1,59	1,91
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,61	0,81	1,02	1,22
0,30	0,226	0,240	0,255	0,269	0,283	0,354	0,424	0,566	0,707	0,849
0,40	0,127	0,135	0,143	0,151	0,159	0,199	0,239	0,318	0,398	0,477
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	0,102	0,127	0,153	0,204	0,255	0,306
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	0,088	0,106	0,141	0,177	0,212
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,078	0,104	0,130	0,156
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0497	0,060	0,080	0,099	0,119
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,038	0,051	0,064	0,076
1,2	0,0142	0,0150	0,0159	0,0168	0,0177	0,0221	0,0265	0,0354	0,0442	0,053
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	0,0162	0,0195	0,0260	0,0325	0,039
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0149	0,0199	0,0249	0,0298
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	0,0060	0,0064	0,0080	0,0095	0,0127	0,0159	0,0191
2,5	0,00326	0,00346	0,00367	0,00387	0,00407	0,0051	0,0061	0,0081	0,0102	0,0122
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00283	0,0035	0,0042	0,0057	0,0071	0,0085
3,5	0,00166	0,00177	0,00187	0,00197	0,00208	0,00260	0,00312	0,00416	0,0052	0,0062
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0,00239	0,00318	0,0040	0,0048

Länge eines Drahtes von

mm	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,025	0,030	0,04	0,05	0,06
0,05	0,123	0,115	0,109	0,103	0,098	0,079	0,065	0,049	0,039	0,0327
0,10	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39	0,314	0,262	0,196	0,157	0,131
0,15	1,11	1,04	0,98	0,93	0,88	0,71	0,59	0,44	0,35	0,295
0,20	1,96	1,85	1,75	1,65	1,57	1,26	1,05	0,79	0,63	0,52
0,25	3,07	2,89	2,73	2,58	2,45	1,96	1,64	1,23	0,98	0,82
0,30	4,4	4,2	3,9	3,7	3,5	2,83	2,36	1,77	1,41	1,18
0,40	7,9	7,4	7,0	6,6	6,3	5,03	4,19	3,14	2,51	2,09
0,50	12,3	11,5	10,9	10,3	9,8	7,85	6,54	4,91	3,93	3,27
0,60	17,6	16,6	15,7	14,9	14,1	11,3	9,4	7,1	5,7	4,7
0,70	24,0	22,6	21,4	20,3	19,2	15,4	12,8	9,6	7,7	6,4
0,80	31,4	29,6	27,9	26,4	25,1	20,1	16,8	12,6	10,1	8,4
1,00	49,1	46,2	43,6	41,3	39,3	31,4	26,2	19,6	15,7	13,1
1,2	71	66	63	59	57	45	37,7	28,3	22,6	18,8
1,4	96	90	86	81	77	62	51,3	38,5	30,8	25,7
1,6	126	118	112	106	101	80	67	50	40	33,5
2,0	196	185	175	165	157	126	105	79	63	52,4
2,5	307	289	273	258	245	196	164	123	98	82
3,0	442	416	393	372	353	283	236	177	141	118
3,5	601	566	535	506	481	385	321	241	192	160
4,0	785	739	698	661	628	503	419	314	251	209

und für spezifische Widerstände von 0,016 – 0,85.

1 m Draht in Ohm.

Messing, Platin, Eisen				Neusilber und andere Widerstandsmaterialien						Drahtdurchmesser
0,07	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,85	mm
36	41	51	76	102	127	153	204	255	433	0,05
8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	108	0,10
4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	48	0,15
2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	27,1	0,20
1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	17,3	0,25
0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	12,0	0,30
0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	6,76	0,40
0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	4,33	0,50
0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	3,00	0,60
0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	2,21	0,70
0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,69	0,80
0,089	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0‘64	1,08	1,00
0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0,75	1,2
0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,55	1,4
0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,423	1,6
0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,271	2,0
0,0143	0,0163	0,0204	0,0305	0,0407	0,051	0,061	0,081	0,102	0,173	2,5
0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,120	3,0
0,0073	0,0083	0,0104	0,0156	0,0208	0,0260	0,0312	0,0416	0,052	0,088	3,5
0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,068	4,0
1 Ohm Widerstand in Metern.										
0,0280	0,0245	0,0196	0,0131	0,0098	0,0079	0,0065	0,0049	0,0039	0,0023	0,05
0,112	0,098	0,079	0,052	0,039	0,0314	0,0262	0,0196	0,0157	0,0092	0,10
0,252	0,221	0,177	0,118	0,088	0,071	0,059	0,044	0,035	0,0208	0;15
0,45	0,39	0,314	0,209	0,157	0,126	0,105	0,079	0,063	0,0370	0,20
0,70	0,61	0,49	0,327	0,245	0,196	0,164	0,123	0,098	0,0578	0,25
1,01	0,88	0,71	0,47	0,35	0,283	0,236	0,177	0,141	0,083	0,30
1,80	1,57	1,26	0,84	0,63	0,503	0,419	0,314	0,251	0,148	0,40
2,80	2,45	1,96	1,31	0,98	0,785	0,654	0,491	0,393	0,231	0,50
4,0	3,53	2,83	1,88	1,41	1,13	0,94	0,71	0,57	0,332	0,60
5,5	4,81	3,85	2,57	1,92	1,54	1,28	0,96	0,77	0,453	0,70
7,2	6,3	5,0	3,25	2,51	2,01	1,68	1,26	1,01	0,592	0,80
11,2	9,8	7,9	5,24	3,93	3,14	2,62	1,96	1,57	0,924	1,00
16,2	14,1	11,3	7,5	5,7	4,5	3,77	2,83	2,26	1,33	1,2
22,0	19,2	15,4	10,3	7,7	6,2	5,13	3,85	3,08	1,81	1,4
28,7	25,1	20,1	13,4	10,1	8,0	6,7	5,0	4,0	2,37	1,6
44,9	39,2	31,4	20,9	15,7	12,6	10,5	7,9	6,3	3,7	2,0
70	61	49	32,7	24,5	19,6	16,4	12,3	9,8	5,8	2,5
101	88	71	47,1	35,3	28,3	23,6	17,7	14,1	8,3	3,0
137	120	96	64	48	38,5	32,1	24,1	19,2	11,3	3,5
180	157	126	84	63	50,3	41,9	31,4	25,1	14,8	4,0

(3) Mathematische Zeichen.

Der AEF hat folgende Zeichen vorgeschlagen:

Nr.	Zeichen	Bedeutung
1.	1. 1)	erstens
2.	( )	Numerierung von Formeln; die Nummern sollen stets am rechten Rande des Textes stehen
3.	°/o, vH	Prozent
4.	°/oo, vT	Promille
5.	/	für ein, pro
6.	÷	bis (statt —)
7.	( ) [ ] { }	Klammer
8.	, ·	Dezimalzeichen; Komma unten, Punkt oben. Zur Gruppenabteilung bei größeren Zahlen darf weder Komma noch Punkt verwandt werden
9.	$0{,}0_5 8$	0,000008
10.	+	plus, mehr, und
11.	−	minus, weniger
12.	· ×	mal, multipliziert mit. Der Punkt steht auf halber Zeilenhöhe
13.	: / —	geteilt durch
14.	=	gleich
15.	≡	identisch mit
16.	≠	nicht gleich
17.	≈	nahezu gleich, rund, etwa
18.	<	kleiner als
19.	>	größer als
20.	≪	klein gegen } von anderer Größenordnung
21.	≫	groß gegen } von anderer Größenordnung
22.	∞	unendlich
23.	√	Wurzelzeichen. Das Zeichen √ erhält einen oben angesetzten wagerechten Strich, an dessen Ende noch ein kurzer Strich angesetzt werden kann.

Nr.	Zeichen	Bedeutung
24.	| |	Determinante
25.	| |	Betrag einer reellen oder komplexen Größe
26.	!	Fakultät
27.	Δ	endliche Zunahme
28.	d	vollständiges Differential
29.	∂	partielles Differential
30.	δ	Variation, virtuelle Änderung
31.	đ	Diminutiv
32.	Σ	Summe von; Grenzbezeichnungen sind unter und über das Zeichen zu setzen. Die Summationsvariable wird unter das Zeichen gesetzt
33.	$\int$	Integral
34.	∥	parallel
35.	⋕	gleich und parallel
36.	⊥	rechtwinklig zu
37.	△	Dreieck
38.	≅	kongruent
39.	∼	ähnlich, proportional
40.	∢	Winkel
41.	$\overline{AB}$	Strecke AB
42.	$\overset{\frown}{AB}$	Bogen AB

Außerdem wird noch verwandt:

Nr.	Zeichen	Bedeutung
43.	$\oint$	Linienintegral, Integral über einen in sich geschlossenen Weg

In England sind einige Zeichen in besonderer Bedeutung üblich:

Nr.	Zeichen	Bedeutung
44.	÷	dividiert durch (vgl. oben Nr. 6)
45.	∴	also, Folgerung
46.	∵	weil, Begründung

(4) Werte von e^{-x}.

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00 .	0,. . .	9990	9980	9970	9960	9950	9940	9930	9920	9910
0,01 .	9900	9891	9881	9871	9861	9851	9841	9831	9822	9812
0,02 .	9802	9792	9782	9773	9763	9753	9743	9734	9724	9714
0,03 .	9704	9695	9685	9675	9666	9656	9646	9637	9627	9618
0,04 .	9608	9598	9589	9579	9570	9560	9550	9541	9531	9522
0,05 .	9512	9503	9493	9484	9474	9465	9455	9446	9437	9427
0,06 .	9418	9408	9399	9389	9380	9371	9361	9352	9343	9333
0,07 .	9324	9315	9305	9296	9287	9277	9268	9259	9250	9240
0,08 .	9231	9222	9213	9204	9194	9185	9176	9167	9158	9148
0,09 .	9139	9130	9121	9112	9103	9094	9085	9076	9066	9057
0,10 .	9048	9039	9030	9021	9012	9003	8994	8985	8976	8967
0,11 .	0,8958	8949	8940	8932	8923	8914	8905	8896	8887	8878
0,12 .	8869	8860	8851	8843	8834	8825	8816	8807	8799	8790
0,13 .	8781	8772	8763	8755	8746	8737	8728	8720	8711	8702
0,14 .	8694	8685	8676	8668	8659	8650	8642	8633	8624	8616
0,15 .	8607	8598	8590	8581	8573	8564	8556	8547	8538	8530
0,16 .	8521	8513	8504	8496	8487	8479	8470	8462	8454	8445
0,17 .	8437	8428	8420	8411	8403	8395	8386	8378	8369	8361
0,18 .	8353	8344	8336	8328	8319	8311	8303	8294	8286	8278
0,19 .	8270	8261	8253	8245	8237	8228	8220	8212	8204	8195
0,2 .	0,8187	8106	8025	7945	7866	7788	7711	7634	7558	7483
0,3 .	7408	7334	7261	7189	7118	7047	6977	6907	6839	6771
0,4 .	6703	6637	6570	6505	6440	6376	6313	6250	6188	6126
0,5 .	6065	6005	5945	5886	5827	5769	5712	5655	5599	5543
0,6 .	0,5488	5434	5379	5326	5273	5220	5169	5117	5066	5016
0,7 .	4966	4916	4868	4819	4771	4724	4677	4630	4584	4538
0,8 .	4493	4449	4404	4360	4317	4274	4232	4190	4148	4107
0,9 .	4066	4025	3985	3946	3906	3867	3829	3791	3753	3716
1,0 .	3679	3642	3606	3570	3534	3499	3465	3430	3396	3362
1,1 .	0,3329	3296	3263	3230	3198	3166	3135	3104	3073	3042
1,2 .	3012	2982	2952	2923	2894	2865	2837	2808	2780	2753
1,3 .	2725	2698	2671	2645	2618	2592	2567	2541	2516	2491
1,4 .	2466	2441	2417	2393	2369	2346	2322	2299	2276	2254
1,5 .	2231	2209	2187	2165	2144	2122	2101	2080	2060	2039
1,6 .	0,2019	1999	1979	1959	1940	1920	1901	1882	1864	1845
1,7 .	1827	1809	1791	1773	1755	1738	1720	1703	1676	1670
1,8 .	1653	1637	1620	1604	1588	1572	1557	1541	1526	1511
1,9 .	1496	1481	1466	1451	1437	1423	1409	1395	1381	1367

Werte von $10^6 \cdot e^{-x}$.

x		x		x		x		x	
2	135336	6	2478,8	10	45,400	14	0,83153	18	0,015230
3	49787	7	911,9	11	16,702	15	0,30590	19	0,005603
4	18316	8	335,5	12	6,144	16	0,11253	20	0,002612
5	6738	9	123,4	13	2,260	17	0,04140	21	0,000758

Beispiel für Zwischenwerte: $e^{-5,175} = e^{-5} \cdot e^{-0,175} = 10^{-6} \cdot 6738 \cdot 0,8395 = 0,005657$.

(5) Umwandlung komplexer Größen

aus der Form $c \cdot e^{-\varphi}$ in die Form $a + b i$ und umgekehrt.

Gebrauch der Tafel s. S. 7. — Zur Abkürzung ist gesetzt $0_3 195$ für 000195.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00		$0_6 50$ *0,057*	$0_5 200$ *0,115*	$0_5 450$ *0,172*	$0_5 800$ *0,229*	$0_4 125$ *0,287*	$0_4 180$ *0,344*	$0_4 245$ *0,401*	$0_4 320$ *0,458*	$0_4 405$ *0,516*
0,01	$0_4 50$ *0,57*	$0_4 61$ *0,63*	$0_4 72$ *0,69*	$0_4 85$ *0,74*	$0_4 98$ *0,80*	$0_3 113$ *0,86*	$0_3 128$ *0,92*	$0_3 145$ *0,97*	$0_3 162$ *1,03*	$0_3 181$ *1,09*
0,02	$0_3 200$ *1,15*	$0_3 221$ *1,20*	$0_3 242$ *1,26*	$0_3 265$ *1,32*	$0_3 288$ *1,37*	$0_3 313$ *1,43*	$0_3 338$ *1,49*	$0_3 365$ *1,55*	$0_3 392$ *1,60*	$0_3 421$ *1,66*
0,03	$0_3 45$ *1,72*	$0_3 48$ *1,78*	$0_3 51$ *1,83*	$0_3 55$ *1,89*	$0_3 58$ *1,95*	$0_3 61$ *2,00*	$0_3 65$ *2,06*	$0_3 69$ *2,12*	$0_3 72$ *2,18*	$0_3 76$ *2,23*
0,04	$0_3 80$ *2,29*	$0_3 84$ *2,35*	$0_3 88$ *2,41*	$0_3 93$ *2,46*	$0_3 97$ *2,52*	00101 *2,85*	00106 *2,63*	00111 *2,69*	00115 *2,75*	00120 *2,81*
0,05	00125 *2,86*	00130 *2,92*	00135 *2,98*	00141 *3,03*	00146 *3,09*	00151 *3,15*	00157 *3,21*	00163 *3,26*	00168 *3,32*	00174 *3,38*
0,06	00180 *3,43*	00186 *3,49*	00192 *3,55*	00199 *3,60*	00205 *3,66*	00211 *3,72*	00218 *3,78*	00225 *3,83*	00231 *3,89*	00238 *3,95*
0,07	00245 *4,00*	00252 *4,06*	00259 *4,12*	00266 *4,18*	00274 *4,23*	00281 *4,29*	00288 *4,35*	00296 *4,40*	00303 *4,46*	00311 *4,52*
0,08	00319 *4,57*	00328 *4,63*	00336 *4,69*	00344 *4,74*	00352 *4,80*	00361 *4,86*	00369 *4,92*	00378 *4,97*	00386 *5,04*	00395 *5,09*
0,09	00404 *5,14*	00413 *5,20*	00422 *5,26*	00432 *5,31*	00441 *5,37*	00450 *5,43*	00460 *5,48*	00469 *5,54*	00479 *5,60*	00489 *5,65*
0,1	0050 *5,71*	0060 *6,28*	0072 *6,84*	0084 *7,41*	0098 *7,97*	0112 *8,53*	0127 *9,09*	0143 *9,65*	0161 *10,20*	0179 *10,76*
0,2	0198 *11,3*	0218 *11,9*	0239 *12,4*	0261 *13,0*	0284 *13,5*	0308 *14,0*	0332 *14,6*	0358 *15,1*	0384 *15,6*	0412 *16,2*
0,3	044 *16,7*	047 *17,2*	050 *17,7*	053 *18,3*	056 *18,8*	059 *19,3*	063 *19,8*	066 *20,3*	070 *20,8*	073 *21,3*
0,4	077 *21,8*	081 *22,3*	085 *22,8*	089 *23,3*	093 *23,7*	097 *24,2*	101 *24,7*	105 *25,2*	109 *25,6*	114 *26,1*
0,5	118 *26,6*	123 *27,0*	127 *27,5*	132 *27,9*	137 *28,4*	141 *28,8*	146 *29,3*	151 *29,7*	156 *30,1*	161 *30,5*
0,6	166 *31,0*	171 *31,4*	177 *31,8*	182 *32,2*	187 *32,6*	193 *33,0*	198 *33,4*	204 *33,8*	209 *34,2*	215 *34,6*
0,7	221 *35,0*	226 *35,4*	232 *35,8*	238 *36,1*	244 *36,5*	250 *36,9*	256 *37,2*	262 *37,6*	268 *38,0*	274 *38,3*
0,8	281 *38,7*	287 *39,0*	293 *39,4*	300 *39,7*	306 *40,0*	312 *40,4*	319 *40,7*	326 *41,0*	332 *41,4*	339 *41,7*
0,9	345 *42,0*	352 *42,3*	359 *42,6*	366 *42,9*	372 *43,2*	379 *43,5*	386 *43,8*	393 *44,1*	400 *44,4*	407 *44,7*

Gebrauch der Tafel (5).

Die linke und die obere Randspalte enthalten die Ziffern eines echten Dezimalbruchs d mit 3 oder 2 Dezimalstellen. Jedes Viereck enthält in der oberen Zahl die Dezimalstellen des Wertes $\sqrt{1+d^2}=1, \ldots$ und darunter einen Winkel φ.

Übergang von der Form

$a \pm ib$ zu $c \cdot e^{\pm i\varphi}$	$c \cdot e^{\pm i\varphi}$ zu $a \pm ib$
$a > b$	$\varphi < 45^\circ$
Zu $b/a = d$ $(9{,}2/20{,}4 = 0{,}45)$ gibt die Tafel φ und $\sqrt{1+(b/a)^2}$; letzteres mit a multipliziert ist $c = \sqrt{a^2+b^2}$ $20{,}4 - 9{,}2\,i = 20{,}4 \cdot 1{,}097 \cdot e^{-24{,}2^\circ i}$ $= 22{,}4 \cdot e^{-24{,}2^\circ i}$	Über φ steht in der Tafel $\sqrt{1+(b/a)^2}$; dies in c dividiert ist a. Die Randspalten geben b/a, welches mit a multipliziert b liefert. $22{,}4 \cdot e^{-24{,}2^\circ i} = \frac{22{,}4}{1{,}097} - 0{,}45 \cdot \frac{22{,}4}{1{,}097}\,i$ $= 20{,}4 - 9{,}2\,i$
$a < b$	$\varphi > 45^\circ$
Zu $a/b = d$ $(9{,}2/20{,}4 = 0{,}45)$ gibt die Tafel einen Winkel, der von 90° zu subtrahieren ist, um φ zu erhalten. $\sqrt{1+(a/b)^2}$ aus der Tafel gibt mit b multipliziert c. $9{,}2 - 20{,}4\,i = 20{,}4 \cdot 1{,}097 \cdot e^{-65{,}8^\circ i}$ $= 22{,}4 \cdot e^{-65{,}8^\circ i}$	φ wird von 90° subtrahiert, über dem so erhaltenen Winkel steht in der Tafel $\sqrt{1+(a/b)^2}$; dies in c dividiert ist b. Die Randspalten geben a/b, welches mit b multipliziert a liefert. $22{,}4 \cdot e^{-65{,}8^\circ i} = -\frac{22{,}4}{1{,}097}\,i + \frac{22{,}4}{1{,}097} \cdot 0{,}45$ $= 9{,}2 - 20{,}4\,i$

(6) Vielfache von 0,736

zur Umrechnung von Pferdestärken in Kilowatt.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		0,74	1,47	2,20	2,94	3,68	4,42	5,15	5,89	6,62
1	7,36	8,10	8,83	9,57	10,30	11,04	11,78	12,51	13,25	13,98
2	14,72	15,46	16,19	16,93	17,66	18,40	19,14	19,87	20,61	21,34
3	22,08	22,82	23,55	24,29	25,02	25,76	26,50	27,23	27,97	28,70
4	29,44	30,18	30,91	31,65	32,38	33,12	33,86	34,59	25,33	36,06
5	36,80	37,54	38,27	39,01	39,74	40,48	41,22	41,95	42,69	43,42
6	44,16	44,90	45,63	46,37	47,10	47,84	48,58	49,31	50,05	50,78
7	51,52	52,26	52,99	53,73	54,46	55,20	55,94	56,67	57,41	58,14
8	58,88	59,61	60,35	61,09	61,82	62,56	63,30	64,03	64,77	68,50
9	66,24	66,98	67,71	68,45	69,18	69,92	70,66	71,39	72,13	72,86
10	73,60	74,34	75,07	75,81	76,54	77,28	78,02	78,75	79,49	80,22
11	80'96	81,70	82,43	83,17	83,90	84,64	85,38	86,11	86,85	87,58
12	88,32	89,06	89,79	90,53	91,26	92,00	92,74	93,47	94,20	94,94
13	95,68	96,42	97,15	97,89	98,62	99,36	100,1	100,8	101,6	102,3
14	103,0	103,8	104,5	105,2	106,0	106,7	107,4	108,2	108,9	119,7
15	110,4	111,1	111,9	112,6	113,3	114,1	114,8	115,6	116,3	117,0
16	117,8	118,5	119,2	120,0	120,7	121,4	122,2	122,9	123,6	124,4
17	125,1	125,9	125,6	127,3	128,1	128,8	129,5	130,3	131,0	131,7
18	132,5	133,2	133,9	134,7	135,4	136,2	136,9	137,6	138,4	139,1
19	139,8	140,6	141,3	142,0	142,8	143,5	144,3	145,0	145,7	146,5

Die Vektorenrechnung.

Ein Vektor ist bestimmt durch die Angabe seines Betrags und seiner Richtung. Gehört zu jedem Punkte eines Raumes ein bestimmter Vektor, so nennt man den Raum ein Vektorfeld. Durch alle Punkte eines Vektorfeldes lassen sich, soweit es stetig ist, Linien ziehen, deren Richtung überall die Richtung des zu dem betreffenden Punkte gehörigen Vektors angibt (Vektorlinien). Niveauflächen, das sind Flächen, die von den Vektorlinien überall senkrecht durchkreuzt werden, lassen sich außer in wirbelfreien (lamellaren) Feldern nur in solchen Feldern angeben, wo der Vektor überall senkrecht auf seinem Wirbel steht (komplexlamellare oder geschichtete Felder).

(7) Begriffe und Formeln aus der Vektoralgebra und der Vektoranalysis.

Inneres Produkt $\mathfrak{A}\mathfrak{B} = (\mathfrak{A}\mathfrak{B}) = |\mathfrak{A}|\,|\mathfrak{B}| \cos(\mathfrak{A},\mathfrak{B})$;

äußeres Produkt $[\mathfrak{A}\mathfrak{B}]$ hat den Betrag $|[\mathfrak{A}\mathfrak{B}]| = |\mathfrak{A}|\,|\mathfrak{B}| \sin(\mathfrak{A},\mathfrak{B})$ = Flächeninhalt des aus $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$ gebildeten Parallelogramms.

Das innere Produkt ist ein Skalar (einfache Zahl); das äußere ein auf der Ebene $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$ senkrecht stehender Vektor. Der durch die Reihenfolge $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$ bestimmte Umlaufsinn des Parallelogramms und die Richtung des äußern Produkts ordnen sich einander zu wie der Drehsinn und der Fortschreitungssinn einer Rechtsschraube.

Rechnungsregeln: $\mathfrak{A}(\mathfrak{B}+\mathfrak{C}+\cdots) = \mathfrak{A}\mathfrak{B}+\mathfrak{A}\mathfrak{C}+\cdots$

$$[\mathfrak{A},\ \mathfrak{B}+\mathfrak{C}+\cdots] = [\mathfrak{A}\mathfrak{B}]+[\mathfrak{A}\mathfrak{C}]+\cdots$$

$$\mathfrak{A}\mathfrak{B} = \mathfrak{B}\mathfrak{A} \qquad [\mathfrak{A}\mathfrak{B}] = -[\mathfrak{B}\mathfrak{A}]$$

Mehrfache Produkte.

$\mathfrak{A}[\mathfrak{B}\mathfrak{C}] = \mathfrak{B}[\mathfrak{C}\mathfrak{A}] = \mathfrak{C}[\mathfrak{A}\mathfrak{B}]$ = Rauminhalt des aus $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ gebildeten Quaders.

$$[\mathfrak{A}[\mathfrak{B}\mathfrak{C}]] = \mathfrak{B}\cdot\mathfrak{A}\mathfrak{C} - \mathfrak{C}\cdot\mathfrak{A}\mathfrak{B}$$

$$[\mathfrak{A}\mathfrak{B}][\mathfrak{C}\mathfrak{D}] = \mathfrak{A}\mathfrak{C}\cdot\mathfrak{B}\mathfrak{D} - \mathfrak{A}\mathfrak{D}\cdot\mathfrak{B}\mathfrak{C}$$

$$[[\mathfrak{A}\mathfrak{B}][\mathfrak{C}\mathfrak{D}]] = \mathfrak{C}\cdot[\mathfrak{B}\mathfrak{D}]\mathfrak{A} - \mathfrak{D}\cdot[\mathfrak{B}\mathfrak{C}]\mathfrak{A}$$

$$\left[\mathfrak{A}\left[\mathfrak{B}[\mathfrak{C}\mathfrak{D}]\right]\right] = \mathfrak{B}\mathfrak{D}\cdot[\mathfrak{A}\mathfrak{C}] - \mathfrak{B}\mathfrak{C}\cdot[\mathfrak{A}\mathfrak{D}]$$

Zerlegung eines Vektors $\mathfrak{A}$ in Komponenten $\parallel$ und $\perp$ zu $\mathfrak{n}$ ($\mathfrak{n}^2 = 1$):

$$\mathfrak{A} = \mathfrak{n}\cdot\mathfrak{A}\mathfrak{n} + [\mathfrak{n}[\mathfrak{A}\mathfrak{n}]].$$

Differentiale. $d(\mathfrak{A}\mathfrak{B}) = \mathfrak{A}\,d\mathfrak{B} + \mathfrak{B}\,d\mathfrak{A}$

$$d[\mathfrak{A}\mathfrak{B}] = [\mathfrak{A}\,d\mathfrak{B}] + [d\mathfrak{A},\mathfrak{B}] = [\mathfrak{A}\,d\mathfrak{B}] - [\mathfrak{B}\,d\mathfrak{A}].$$

Differentialquotienten. Ist V ein Raumteil, F seine Oberfläche, df ein Oberflächenelement, $\mathfrak{n}$ ein die äußere Normalenrichtung dieses Elements anzeigender Einheitsvektor (Betrag 1), $d\mathfrak{f} = \mathfrak{n}\,df$ also der Vektor des Oberflächenelements, so ist[1])

$$\text{der Gradient von } p = \operatorname{grad} p = \lim_{V=0} \frac{1}{V}\int_F p\,d\mathfrak{f},$$

$$\text{die Divergenz von } \mathfrak{A} = \operatorname{div} \mathfrak{A} = \lim_{V=0} \frac{1}{V}\int_F \mathfrak{A}\,d\mathfrak{f},$$

$$\text{der Rotor (Wirbel) von } \mathfrak{A} = \operatorname{rot} \mathfrak{A} = \lim_{V=0} \frac{1}{V}\int_F [d\mathfrak{f}\,\mathfrak{A}].$$

grad p ist ein Vektor, dessen Komponente nach irgend einer Richtung s den Anstieg $\partial p/\partial s$ der skalaren Größe p in der Richtung s angibt.

---

[1]) W. v. Ignatowsky, Die Vektoranalysis. Leipzig 1909. — J. Spielrein, Lehrbuch d. Vektorrechnung, Stuttgart 1916, S. 77 ff.

div $\mathfrak{A}$ ist der aus der (unendlich kleinen) Volumeinheit austretende Fluß des Vektors $\mathfrak{A}$ und somit ein Maß für die Zahl der in der Volumeinheit entspringenden $\mathfrak{A}$-Linien.

rot $\mathfrak{A}$ ist ein Vektor. Deutet man $\mathfrak{A}$ als Kraft, so ist die Komponente von rot $\mathfrak{A}$ nach irgend einer Richtung die mechanische Arbeit, die bei einem vollständigen Umlauf um eine senkrecht zu jener Richtung stehende (unendlich kleine) Flächeneinheit durch $\mathfrak{A}$ geleistet wird[1]).

$$(\mathfrak{A}\ \mathrm{grad})\ \mathfrak{B} = \lim_{V=0} \frac{\mathfrak{A}}{V} \oint_F d\mathfrak{f} \cdot \mathfrak{B}$$

ist ein Vektor, der die mit $|\mathfrak{A}|$ multiplizierte Änderung angibt, die $\mathfrak{B}$ erfährt, wenn man in der Richtung von $\mathfrak{A}$ um die Längeneinheit fortschreitet.

$$\Delta p = \mathrm{div\ grad}\ p$$

$$\Delta \mathfrak{A} = \lim_{V=0} \frac{1}{V} \oint_F (d\mathfrak{f}\ \mathrm{grad})\mathfrak{A}.$$

R e c h n u n g s r e g e l n. $\mathrm{rot\ grad}\ p = 0$

$$\mathrm{div\ rot}\ \mathfrak{A} = 0$$

$$\mathrm{grad}\ \mathfrak{A}\mathfrak{B} = (\mathfrak{A}\ \mathrm{grad})\ \mathfrak{B} + (\mathfrak{B}\ \mathrm{grad})\ \mathfrak{A} + [\mathfrak{A}\ \mathrm{rot}\ \mathfrak{B}] + [\mathfrak{B}\ \mathrm{rot}\ \mathfrak{A}]$$

$$\mathrm{div}\ [\mathfrak{A}\mathfrak{B}] = \mathfrak{B}\ \mathrm{rot}\ \mathfrak{A} - \mathfrak{A}\ \mathrm{rot}\ \mathfrak{B}$$

$$\mathrm{rot}\ [\mathfrak{A}\mathfrak{B}] = (\mathfrak{A}\ \mathrm{grad})\ \mathfrak{B} - (\mathfrak{B}\ \mathrm{grad})\ \mathfrak{A} + \mathfrak{B}\ \mathrm{div}\ \mathfrak{A} - \mathfrak{A}\ \mathrm{div}\ \mathfrak{B}$$

$$\mathrm{div}\ \mathfrak{A}p = \mathfrak{A}\ \mathrm{grad}\ p + p\ \mathrm{div}\ \mathfrak{A}$$

$$\mathrm{rot}\ \mathfrak{A}p = -[\mathfrak{A}\ \mathrm{grad}\ p] + p\ \mathrm{rot}\ \mathfrak{A}$$

$$\mathrm{rot\ rot}\ \mathfrak{A} = \mathrm{grad\ div}\ \mathfrak{A} - \Delta\mathfrak{A}$$

$$(\mathrm{grad}\ \mathfrak{A})\mathfrak{B} = (\mathfrak{A}\ \mathrm{grad})\ \mathfrak{B} + \mathfrak{B}\ \mathrm{div}\ \mathfrak{A}.$$

U n s t e t i g k e i t e n. Die wichtigsten in den Anwendungen vorkommenden Unstetigkeiten sind e n d l i c h e S p r ü n g e v o n S k a l a r e n u n d V e k t o r e n l ä n g s g e w i s s e r F l ä c h e n. An solchen Flächen würde der im vorhergehenden definierte r ä u m l i c h e G r a d i e n t, die r ä u m l i c h e D i v e r g e n z und der r ä u m l i c h e W i r b e l unendlich groß werden, also den Sinn verlieren. Man spricht aber an der Sprungfläche von

einem F l ä c h e n g r a d i e n t e n von p . . . $\mathrm{Grad}\ p = p_1\mathfrak{n}_1 + p_2\mathfrak{n}_2$;

einer F l ä c h e n d i v e r g e n z von $\mathfrak{A}$ . . . . $\mathrm{Div}\ \mathfrak{A} = \mathfrak{A}_1\mathfrak{n}_1 + \mathfrak{A}_2\mathfrak{n}_2$;

einem F l ä c h e n w i r b e l von $\mathfrak{A}$ . . . . . . $\mathrm{Rot}\ \mathfrak{A} = [\mathfrak{n}_1\mathfrak{A}_1] + [\mathfrak{n}_2\mathfrak{A}_2]$.

$\mathfrak{n}$ ist ein Einheitsvektor in Richtung der von der Fläche hinwegweisenden Normalen; die beiden Seiten der Sprungfläche werden durch die Zeiger 1 und 2 unterschieden.

Der F l ä c h e n g r a d i e n t ist also ein Vektor vom Betrag des Sprunges $p_1 - p_2$, der nach der Seite der höheren p-Werte weist.

Die F l ä c h e n d i v e r g e n z ist ein Skalar, der den Sprung der normalen Komponenten $A_{n_1} + A_{n_2}$ des Vektors $\mathfrak{A}$ mißt.

Der F l ä c h e n w i r b e l ist ein in der Sprungfläche liegender Vektor, der vom Betrage des Sprungs der tangentialen Komponenten abhängt.

I n t e g r a l s ä t z e.

L i n i e n i n t e g r a l e.

$$\int_P^Q d\mathfrak{r}\ \mathrm{grad}\ \varphi = \varphi_Q - \varphi_P,$$

---

[1]) Der Umlaufsinn bestimmt hierbei zusammen mit der angenommenen Richtung eine Rechtsschraube.

$$\int_P^Q (d\mathfrak{r}\ \mathrm{grad})\,\mathfrak{A} = \mathfrak{A}_Q - \mathfrak{A}_P.$$

$d\mathfrak{r}$ ist ein Element der Linie PQ.

Beziehungen zwischen Flächenintegral und Randintegral

$$\oint \mathfrak{A}\, d\mathfrak{r} = \int_F \mathrm{rot}\,\mathfrak{A}\, \mathrm{d}\mathfrak{f} \quad \text{(Satz von Stokes).}$$

$\mathrm{d}\mathfrak{f}$ ist der Vektor eines Elements $\mathrm{d}f$ der Fläche F; $\mathrm{d}\mathfrak{r}$ ein Element ihres Randes.

Beziehungen zwischen Raumintegral und Hüllenintegral

$$\oint \mathfrak{A}\, \mathrm{d}\mathfrak{f} = \int_V \mathrm{div}\,\mathfrak{A}\, \mathrm{d}v \quad \text{(Satz von Gauß),}$$

$$\oint (\varphi\, \mathrm{grad}\,\psi - \psi\, \mathrm{grad}\,\varphi)\, \mathrm{d}\mathfrak{f} = \int_V (\varphi \Delta \psi - \psi \Delta \varphi)\, \mathrm{d}v \quad \text{(Satz von Green),}$$

$$\oint \varphi\, \mathrm{rot}\,\mathfrak{A}\, \mathrm{d}\mathfrak{f} = \int_V \mathrm{grad}\,\varphi\ \mathrm{rot}\,\mathfrak{A}\, \mathrm{d}v$$ (Satz vom Raumintegral des inneren Produktes eines wirbelfreien Vektors mit einem quellenfreien Vektor).

$\mathrm{d}v$ ist ein Element des Raumes V; $\mathrm{d}\mathfrak{f}$ ist der Vektor eines Oberflächenelements seiner Hülle.

(8) Allgemeine rechtsläufige orthogonale Koordinaten. Die vorstehenden Definitionen und Rechnungsregeln sind unabhängig von der Wahl einer bestimmten Raumeinteilung, also vom Koordinatensystem. Dieses braucht man erst, wenn man in besonderen Fällen die räumliche Feldverteilung wirklich berechnen will. Dazu eignen sich am besten die orthogonalen Systeme, bei denen der Raum durch drei sich überall senkrecht durchschneidende Flächenscharen in kleine quaderähnliche Raumteile zerlegt wird. Wenn wir eine bestimmte Fläche F_1 aus der ersten Schar durch die Größe (Koordinate) u, eine bestimmte Fläche F_2 der zweiten Schar durch eine zweite Koordinate v und eine Fläche F_3 der dritten Schar durch w festlegen, so bestimmt der Schnittpunkt der drei Flächen den Punkt $P(u, v, w)$. Die Koordinate $u + \mathrm{d}u$ bestimmt eine zu F_1 benachbarte Fläche, die von dieser den Abstand

$$\partial s_u = U\ \mathrm{d}u$$

hat, wo U im allgemeinen eine Funktion des Ortes, das ist der Koordinaten u, v, w sein wird.

Entsprechend sind

$$\partial s_v = V\ \mathrm{d}v \quad \text{und} \quad \partial s_w = W\ \mathrm{d}w$$

die Abstände der durch v und $v + \mathrm{d}v$, bzw. der durch w und $w + \mathrm{d}w$ bestimmten Flächen. Die 6 Flächen schließen ein Quaderchen vom Rauminhalte

$$U V W\ \mathrm{d}u\ \mathrm{d}v\ \mathrm{d}w$$

ein. Die zu $u + \mathrm{d}u$, $v + \mathrm{d}v$ und $w + \mathrm{d}w$ gehörenden Flächen schneiden sich in einem Punkte P_1, dessen Abstand von P die Diagonale des Quaders

$$\mathrm{d}s = \sqrt{(U\ \mathrm{d}u)^2 + (V\ \mathrm{d}v)^2 + (W\ \mathrm{d}w)^2}$$

ist.

Sind die Größen u, v, w als Funktionen der rechtwinkligen kartesischen Koordinaten x, y, z gegeben, so ist

$$U^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u}\right)^2$$

oder auch

$$\frac{1}{U^2} = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2.$$

Beispiele:

1. Kartesische Koordinaten.

$$u = x \quad U = 1$$
$$v = y \quad V = 1$$
$$w = z \quad W = 1$$

2. Zylinderkoordinaten (Kreiszylinder) (Abb. 1).

$$u = r \quad x = r\cos\varphi \quad U = 1$$
$$v = \varphi \quad y = r\sin\varphi \quad V = r$$
$$w = z \quad z = z \quad W = 1.$$

3. Koordinaten des elliptischen Zylinders (Abb. 2).

Die Schnittlinien der Flächen $u = \text{const}$, bzw. $v = \text{const}$ mit einer Ebene $z = w = \text{const}$ sind konfokale Ellipsen, bzw. Hyperbeln mit der Exzentrizität e.

$$\begin{array}{lll} u & x = e\,\mathfrak{Cof}\,u\,\cos v & U = V = e\sqrt{\mathfrak{Sin}^2 u + \sin^2 v} \\ v & y = e\,\mathfrak{Sin}\,u\,\sin v & \quad\;\; = e\sqrt{\mathfrak{Cof}^2 u - \cos^2 v} \\ w & z = w & W = 1 \end{array}$$

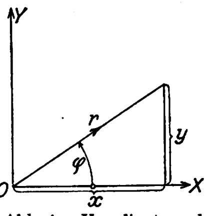


Abb. 1. Koordinaten des Kreiszylinders.

4. Kugelkoordinaten.

$$\begin{array}{lll} u = r = \text{Abstand vom Mittelpunkt} & x = r\sin\vartheta\cos\varphi & U = 1 \\ v = \vartheta = 90° - \text{geogr. Breite} & y = r\sin\vartheta\sin\varphi & V = r \\ w = \varphi = \text{geogr. Länge} & z = r\cos\vartheta & W = r\sin\vartheta. \end{array}$$

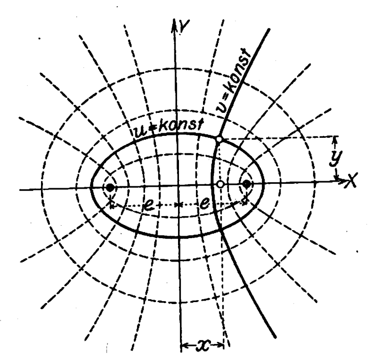


Abb. 2. Koordinaten des elliptischen Zylinders.

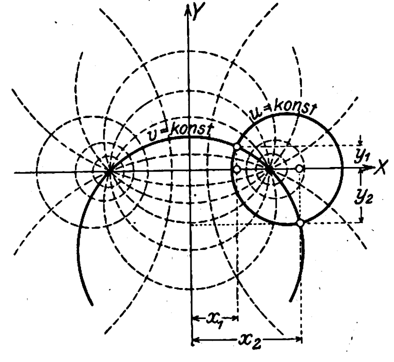


Abb. 3. Bipolarkoordinaten.

5. Bipolarkoordinaten (Abb. 3).

Die Schnittlinien der Flächen $u = \text{const}$, bzw. $v = \text{const}$ mit der Ebene $z = w = \text{const}$ sind Kreisscharen; die Kreise der Schar $v = \text{const}$ gehen sämtlich durch die beiden Mittelpunkte

$$\begin{array}{llll} u & \mathfrak{Cotg}\,u = \dfrac{x^2+y^2+a^2}{2ax} & x = \dfrac{a\,\mathfrak{Sin}\,u}{\mathfrak{Cof}\,u \mp \cos v} & U = \dfrac{a}{\mathfrak{Cof}\,u \mp \cos v} \\ v & \operatorname{cotg} v = \dfrac{x^2+y^2-a^2}{2ay} & y = \dfrac{a\sin v}{\pm\,\mathfrak{Cof}\,u - \cos v} & V = \dfrac{a}{\mathfrak{Cof}\,u \mp \cos v} \\ w & w = z & z = w & W = 1. \end{array}$$

Weitere Beispiele bei W. E. Byerly, An elementary treatise on Fouriers Series and spherical, cylindrical and ellipsoidal harmonics. Boston 1893. S. 238 ff.

Ausdrücke skalarer Größen in orthogonalen Koordinaten.

Inneres Produkt:

$$\mathfrak{A}\,\mathfrak{B} = \mathfrak{A}_u\,\mathfrak{B}_u + \mathfrak{A}_v\,\mathfrak{B}_v + \mathfrak{A}_w\,\mathfrak{B}_w.$$

Divergenz:

$$\operatorname{div}\mathfrak{A} = \frac{1}{UVW}\left\{\frac{\partial}{\partial u}(VW\mathfrak{A}_u) + \frac{\partial}{\partial v}(UW\mathfrak{A}_v) + \frac{\partial}{\partial w}(UV\mathfrak{A}_w)\right\}.$$

Deltaableitung (Divergenzgradient):

$$\Delta p = \frac{1}{UVW}\left\{\frac{\partial}{\partial u}\left(\frac{VW}{U}\frac{\partial p}{\partial u}\right) + \frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{UW}{V}\frac{\partial p}{\partial v}\right) + \frac{\partial}{\partial w}\left(\frac{UV}{W}\frac{\partial p}{\partial w}\right)\right\}.$$

Vektorkomponenten in orthogonalen Koordinaten.

Äußeres Produkt:

$$[\mathfrak{A}\mathfrak{B}]_u = \mathfrak{A}_v\,\mathfrak{B}_w - \mathfrak{A}_w\,\mathfrak{B}_v$$
$$[\mathfrak{A}\mathfrak{B}]_v = \mathfrak{A}_w\,\mathfrak{B}_u - \mathfrak{A}_u\,\mathfrak{B}_w$$
$$[\mathfrak{A}\mathfrak{B}]_w = \mathfrak{A}_u\,\mathfrak{B}_v - \mathfrak{A}_v\,\mathfrak{B}_u$$

Gradient:

$$\operatorname{grad}_u p = \frac{1}{U}\frac{\partial p}{\partial u}$$
$$\operatorname{grad}_v p = \frac{1}{V}\frac{\partial p}{\partial v}$$
$$\operatorname{grad}_w p = \frac{1}{W}\frac{\partial p}{\partial w}$$

Rotor (Wirbel):

$$\operatorname{rot}_u \mathfrak{A} = \frac{1}{VW}\left\{\frac{\partial}{\partial v}(W\mathfrak{A}_w) - \frac{\partial}{\partial w}(V\mathfrak{A}_v)\right\}$$
$$\operatorname{rot}_v \mathfrak{A} = \frac{1}{UW}\left\{\frac{\partial}{\partial w}(U\mathfrak{A}_u) - \frac{\partial}{\partial u}(W\mathfrak{A}_w)\right\}$$
$$\operatorname{rot}_w \mathfrak{A} = \frac{1}{UV}\left\{\frac{\partial}{\partial u}(V\mathfrak{A}_v) - \frac{\partial}{\partial v}(U\mathfrak{A}_u)\right\}.$$

Literatur über Vektorenrechnung.

M. Abraham, Geometrische Grundbegriffe. Enzykl. d. math. Wiss. IV, 14. Leipzig 1901. — Abraham-Föppl, Theorie der Elektrizität, Bd. I, Leipzig 1904, 1907, 1912, 1918. — R. Gans, Einführung in die Vektoranalysis mit Anwendungen auf die mathematische Physik. Leipzig 1905, 1910. — S. Valentiner, Vektoranalysis. Leipzig 1907, 1912. — Gibbs-Wilson, Vector-Analysis. New Haven, Yale Univ. Press 1913. 2. Aufl. — W. v. Ignatowsky, Die Vektoranalysis und ihre Anwendung in der theoret. Physik. 2 Teile. Leipzig 1909. — E. Budde, Tensoren und Dyaden im dreidimensionalen Raum. Braunschweig 1914. — J. Spielrein, Lehrbuch der Vektorrechnung. Stuttgart 1916.

(9) Näherungsformeln für das Rechnen mit kleinen Größen.

d und δ bedeuten gegen 1 bzw. φ sehr kleine Größen; δ und φ im Bogenmaß.

$$(1 \pm d)^m = 1 \pm m d, \quad \text{für jedes reelle } m.$$

$$\frac{1 \pm d_1}{1 \pm d_2} = 1 \pm d_1 \mp d_2 \qquad (1 \pm d_1)(1 \pm d_2) = 1 \pm d_1 \pm d_2$$

$$\sin\delta = \delta - {}^1/_6\,\delta^3 \qquad \sin(\varphi \pm \delta) = \sin\varphi \pm \delta\cos\varphi$$

$$\cos\delta = 1 - {}^1/_2\,\delta^2 \qquad \cos(\varphi \pm \delta) = \cos\varphi \mp \delta\sin\varphi$$

$$\operatorname{tg}\delta = \delta + {}^1/_3\,\delta^3 \qquad \operatorname{tg}(\varphi \pm \delta) = \operatorname{tg}\varphi \pm \frac{\delta}{\cos^2\varphi}$$

$$a^d = 1 + d\log\operatorname{nat} a \qquad \log\operatorname{nat}(1 \pm d) = \pm d - {}^1/_2\,d^2.$$

(10) Bezeichnungen.

Die folgende Tafel ist in erster Linie auf den Sätzen und Vorschlägen des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen (AEF) aufgebaut (vgl. S. 653); auf die Festsetzungen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) wurde Rücksicht genommen. Die Lichtgrößen sind nach den Beschlüssen des Elektrotechnischen Vereins, des Vereins der Gas- und Wasserfachmänner und des Verbandes Deutscher Elektrotechniker vom Jahre 1897 aufgenommen.

Die Einheitszeichen sind lateinische gerade Buchstaben; für die elektrischen Einheiten wurden große Buchstaben gewählt. Die Zeichen für Größen sind entweder lateinische Kursiv-, deutsche Fraktur- oder griechische Buchstaben; die Vektoren werden durch Frakturbuchstaben dargestellt, die Eigenschaften der Stoffe vorzugsweise durch kleine griechische Buchstaben. Die Vielfachen und Teile von Einheiten werden aus letzteren durch Vorsetzen bestimmter Buchstaben abgeleitet: $M = 10^6$; $\mathrm{k} = 10^3$; $\mathrm{h} = 10^2$; $\mathrm{d} = 10^{-1}$; $\mathrm{c} = 10^{-2}$; $\mathrm{m} = 10^{-3}$; $\mu = 10^{-6}$. Die Einheitszeichen werden in Verbindung mit Zahlen benutzt; in Buchstabenformeln schreibt man die Einheitsnamen aus.

In Fällen, wo mehrere Größen derselben Art gleichzeitig in den Formeln auftreten, werden neben den in der Tafel angegebenen Zeichen die zugehörigen großen bzw. kleinen Buchstaben desselben Alphabets und die gleichlautenden Buchstaben anderer Alphabete verwandt. Gelegentlich werden auch Zeichen verwendet, welche die Tafel nicht aufführt.

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungsgleichungen	Dimension	Technische Einheit		
				Zeichen	Name oder Bezeichnung	Wert in CGS
	1. Grundmaße.					
l	Länge		L	cm m μ	Zentimeter Meter Mikron=0,001 mm	1 10^2 10^{-4}
m	Maße		M	g γ	Gramm = 0,001 mg	1 10^{-6}
t	Zeit		T	h min s	Stunde, Minute, Sekunde } Zeiträume	3600 60 1
				Dieselben Zeichen erhöht für Zeitpunkte, statt min auch m, wo kein Mißverständnis zu befürchten.		
	2. Zahlen, geometrische und mechanische Größen.					
α, β .. φ η m	Winkel, Bogen Voreilwinkel, Phasenverschieb. Wirkungsgrad Windungszahl		0 0 0 0		arc sin 57,3° = 1	
r d λ	Halbmesser Durchmesser Wellenlänge		} L			
F q	Fläche, Oberfläche Querschnitt		} L^2	m^2 cm^2 a	Quadratmeter Quadratzentimeter Ar = 100 m^2	10^4 1 10^6
V	Raum, Volumen		L^3	m^3 cm^3	Kubik(Raum)meter Kubikzentimeter	10^6 1
v a	Geschwindigkeit Beschleunigung		LT^{-1} LT^{-2}	l λ	Liter = 0,001 ml	10^3 10^{-3}
n ω f ω	Umlaufzahl Winkelgeschwindigkeit Frequenz Kreisfrequenz		} T^{-2}	U/min Per/s Per/2πs	Umdrehungen in 1 min Perioden in 1 s Perioden in 2π s	$^1/_{60}$ 1 $^1/_{2\pi}$
P	Kraft	$P = m \cdot a$	LMT^{-2}	kg* g*	Kilogramm-Kraft Gramm-Kraft	$981 \cdot 10^3$ 981

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungs-gleichungen	Dimension	Technische Einheit: Zeichen	Technische Einheit: Name oder Bezeichnung	Technische Einheit: Wert in CGS
A	Arbeit	$A = P \cdot l$	L^2MT^{-2}	kgm ft lb kWh	Kilogrammeter engl. Fußpfund Kilowattstunde	$98{,}1 \cdot 10^6$ $13{,}5 \cdot 10^6$ $36 \cdot 10^{12}$
W	Energie					
N	Leistung, Effekt	$N = \dot{A}/t$	L^2MT^{-3}	kW P, PS HP	Kilowatt Pferd = 75 kgm/s Horsepower, engl.	10^{10} $736 \cdot 10^7$ $746 \cdot 10^7$
p	Druck, Spannung (Druckkraft durch Fläche)	$p = P/q$	$L^{-1}MT^{-2}$	kg*/mm²	Kilogramm auf das Quadratmillimeter	$98{,}1 \cdot 10^6$
J	Trägheitsmoment		L^2M	Atm	physik. Atmosphäre 76 cm Hg von 0°	$1{,}013 \cdot 10^6$
C	Zentrifugalmoment		L^2MT^{-2}			
M	Moment einer Kraft		L^2MT^{-2}	at	technische Atm. 1 at = 1 kg*/cm²	$98{,}8 \cdot 10^4$
δ	spez. Gewicht		0			
E	Elastizitätsmodul	$\alpha = 1/E$	$L^{-1}MT^{-2}$			
α	Dehnungskoeffizient		$LM^{-1}T^2$			
μ	Reibungszahl					

3. Wärme.

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungs-gleichungen	Dimension	Zeichen	Name oder Bezeichnung	Wert in CGS
Q	Wärmemenge			cal kcal	Calorie Kilocalorie	$4{,}184 \cdot 10^7$ $4{,}184 \cdot 10^{10}$ [1]
T t	Temperatur, abs. Temper. v. Eispunkt	$T = 273 + t$			1 kcal (15°) = 427,2 kgm 1 BThU (British Thermal Unit) = 778 ft lbs = 107,6 kgm = 0,252 kcal	
c α	spez. Wärme Wärmeausdehnungs-Koeffizient	$c = Q/m(t_2 - t_1)$				

4. Licht.

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungs-gleichungen	Dimension	Zeichen	Name oder Bezeichnung
J	Lichtstärke			HK	Kerze (Hefnerkerze)
Φ	Lichtstrom	$\Phi = J\omega = JS/r^2$		Lm	Lumen (Hefnerlumen)
E	Beleuchtung	$E = J/r^2 = \Phi/S$		Lx	Lux (Hefnerlux)
e	Flächenhelle	$e = J/s$			
Q	Lichtabgabe	$Q = \Phi \cdot T$			

φ räumlicher Winkel; S in m², s = cm², ⊥ zur Strahlenrichtung; r in m; T in Stunden.

5. Magnetismus.

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungs-gleichungen	Dimension	Zeichen	Name oder Bezeichnung	Wert in CGS
$\mathfrak{M}$	magnet. Moment		$L^{5/2}M^{1/2}T^{-1}$			
$\mathfrak{J}$ $\mathfrak{H}$ $\mathfrak{B}$	Magnetisierungs-stärke magnet. Feldstärke magnet. Dichte (Induktion)	$\mathfrak{J} = \mathfrak{M}/V$ $\mathfrak{H} = \mathfrak{F}/l = 4\pi NI/l$ $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\,\mathfrak{J}$ $\mathfrak{B} = \mu\,\mathfrak{H}$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$		Gauß	1
$\mathfrak{F}$	magnetomotorische Kraft	$\mathfrak{F} = l \cdot \mathfrak{H}$ $\mathfrak{F} = 4\,\pi\,NI$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$		Gilbert	1
Φ	magnet. Kraftfluß	$\Phi = \mathfrak{F}/\mathfrak{R} = q \cdot \mathfrak{B}$	$L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$		Maxwell	1
$\mathfrak{R}$	magnet. Widerstand (Reluktanz)	$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{q}$	L^{-1}		Oersted	1
μ $\varkappa$	magnet. Durchlässigkeit magnet. Aufnahme-fähigkeit	$\mu = 1 + 4\pi\varkappa = \mathfrak{B}/\mathfrak{H}$ $\varkappa = \frac{\mu - 1}{4\,\pi} = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$	0			
η	Koeff. d. magnet. Hysterese					
p v	Zahl der Polpaare Streuungskoeffizient					

[1] 4,184 neuester Zahlenwert, vgl. Verh. D. Phys. Ges. 1919, S. 25. — Die vom AEF festgesetzte ältere Zahl ist 4,189.



Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungsgleichungen	Dimension	Technische Einheit: Zeichen	Technische Einheit: Name oder Bezeichnung	Technische Einheit: Wert in CGS	
			6. Elektrizität.				
$\mathfrak{E}$ $\mathfrak{D}$	Elektr. Feldstärke Dielektr. Verschiebung	 $\mathfrak{D} = \varepsilon\,\mathfrak{E}/4\pi c^2$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-}$ $L^{-3/2}M^{1/2}$				Westonsches Normalelement Form der Reichsanstalt $1{,}0183 - 0{,}0000406\,(t-20) - 0{,}00000095\,(t-20)^2 - 0{,}00000001\,(t-20)^3$ V bei 4° gesätt. Lösung 1,0187 V Clarksches Normalelement $1{,}4263 - 0{,}00126\,(t-20) - 0{,}000007\,(t-20)^2$ V
E P V	Elektromotorische Kraft Spannung, Potentialdiff. Potential gegen Erde	$E = I \cdot R$ $P = V_1 - V_2$	$L^{3/2}M^{1/2}$ T^{-2}	V	Volt	10^8	
I Q i	Stromstärke Elektrizitätsmenge Stromdichte	$I = \frac{E}{R}$ $Q = I \cdot T$ $i = I/q$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$ $L^{1/2}M^{1/2}$ $L^{-3/2}M^{-1/2}$ T^{-1}	A C Ah	Ampere Coulomb Ampere-Stunde	10^{-1} 10^{-1} 360	1 A in 1 s = 1 C: 0,0933 mg H^2O, 0,328 mg Cu, 1,118 mg Ag, 0,337 mg Zn Valenzladung F = 96494 Wert d. D. Bunsengesellsch. 96540
D B	Durchflutung Strombelag	$D = NI$ $B = Dl$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$ $L^{-1/2}M^{1/2}$ T^{-1}	AW $\frac{\text{AW}}{\text{cm}}$	Amperewindung	10^{-1} 10^{-1}	
A	elektrische Arbeit	$A = Q \cdot E$	$L^{-2}MT^{-2}$	VC J Wh kWh	Voltcoulomb Joule Wattstunde Kilowattstunde	10^{-7} 10^{-7} $36 \cdot 10^9$ $36 \cdot 10^{12}$	1 J = 1 VC = 0,10195 kgm = 0,23865 kal (15°)
N	elektrische Leistung	$N = E \cdot I$ $= A/T$	L^2MT^{-3}	W kW BTU	Watt Kilowatt Board of Trade Unit	10^7 10^{10} 10^{10}	1 W = $^1/_{736}$ P = 0,00136 P 1 BTU (auch 1 U) = 1 kW
R	Widerstand	$R = E/I$ $R = I\,l/q$	LT^{-1}	Ω $M\,\Omega$	Ohm Megohm	10^9 10^{15}	Werte in m/mm² Hg von 0° 1 legales Ohm = 1,06 1 internation. Ohm = 1,063
G	Leitwert	$G = 1/R$	$L^{-1}T$	S	Siemens	10^{-9}	
C	Kapazität	$C = \frac{Q}{E}$	$L^{-1}T^2$	F μF	Farad Mikrofarad	10^{-9} 10^{-15}	
L M	Selbstinduktivität Gegeninduktivität	$L = \frac{\Phi}{I}$	L	H	Henry	10^9	
ϱ χ $\varkappa$ Λ	spezif. Widerstand spez. Leitwert d. Leiter 1. Kl. Leitfähigkeit d. Elektrolyte Äquivalentleitvermögen	$\varrho = \frac{1}{\chi}$ $\varkappa = 10^4\chi$ $\Lambda = \frac{\varkappa}{\eta}$	L^2T^{-1} $L^{-2}T$ $M^{-1}LT$	ϱ und χ bezogen auf Ohm $\varkappa$ auf d. Würfel von 1 cm Seite			
α η γ ε	elektrochem. Äquivalent Konzentration in Grammäquivalent auf 1 cm³ Lösung Dissoziationsgrad Dielektrizitätskonstante						

Elektrostatisches oder mechanisches Maß.

Potential 1 = 300 V.
Widerstand 1 = $9 \cdot 10^{11}$ Ω
Strom 1 = $\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ A
Menge 1 = $\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ C
Kapazität 1 = $\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F
„ 1 cm = $\frac{1}{9} \cdot 10^{-5}$ μF

Zusammengesetzte Wechselstromgrößen.

Nach dem Vorschlag des AEF bezeichnet man die Wechselstromgrößen als Wirk-, Schein- und Blindgrößen, vgl. (109). Der Wirkstrom wird auch Wattstrom, der Blindstrom wattloser Strom genannt. Außerdem werden folgende Benennungen gebraucht:

Reaktanz = $\omega L - 1/\omega C$; — Impedanz = $\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$; — Admittanz = $1/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$; — Konduktanz = $R/[R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]$; — Suszeptanz = $[\omega L - 1/\omega C]/[R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]$.

(11) Englisches Gewicht und Maß.

1 ton = 1016,0 kg = 20 cwt, Hundredweigths.
1 cwt = 50,80 kg = 4 qrs, Quarters = 8 stones = 112 lbs, pounds.
1 lb = 0,4536 kg = 16 ozs, ounzes = 256 drams = 7680 grains.
1 pound troy = 373,242 g.
1 lb - ft = 0,1383 kgm.
1 ton per sq. inch = 1,575 kg*/mm². — 1 lb per sq. inch = 0,0703 kg*/cm².

1 yard = 3 engl. Fuß = 0,914 m. 1 engl. statute mile = 1609,31 m;
1 London mile = 1523,97 m; 1 Seemeile = 1855,11 m.
1 circular mill = 0,000506 mm²; 1 mm² = 1970 circular mills.
Hohlmaße: 1 quarter = 8 bushels = 290,781 l.
1 gallon = 4 quarts = 8 pints = 32 gills = 4,543 l.

Englisches Maß in Metermaß und umgekehrt.

	Fuß in Meter	Quadr.-F. in Quadr.-Meter	Kubik-F. in Kubik-Meter	Zoll in Zentimeter	Quadr.-Z. in Quadr.-Zentimeter	Kub.-Zoll in Kubik-Zentimeter	Meter in Fuß	Meter in Zoll	Quadratmeter in Quadr.-Fuß	Quadratmeter in Quadr.-Zoll 100 ×	Kubikmeter in Kubik-Fuß	Kubikmeter in Kubik-Zoll 1000 ×
1	0,305	0,093	0,0283	2,54	6,45	16,4	3,28	39,4	10,8	15,5	35,3	61,0
2	0,610	0,186	0,0566	5,08	12,90	32,8	6,56	78,7	21,5	31,0	70,6	122,1
3	0,914	0,279	0,0849	7,62	19,35	49,2	9,84	118,1	32,3	46,5	105,9	183,1
4	1,219	0,372	0,1133	10,16	25,81	65,5	13,12	157,5	43,1	62,0	141,3	244,1
5	1,524	0,464	0,1416	12,70	32,26	81,9	16,40	196,9	53,8	77,5	176,6	305,1
6	1,829	0,557	0,1699	15,24	38,71	98,3	19,69	236,2	64,6	93,0	211,9	366,2
7	2,134	0,650	0,1982	17,78	45,16	114,7	22,97	275,6	75,4	108,5	247,2	427,2
8	2,438	0,743	0,2265	20,32	51,61	131,1	26,25	315,0	86,1	124,0	282,5	488,2
9	2,743	0,836	0,2548	22,86	58,06	147,5	29,53	354,3	96,9	139,5	317,8	549,2

Englische Reichslehre (Imperial Standard Wire Gauge).

Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm
7/0	12,7	2	7,01	10	3,25	18	1,22	26	0,46	34	0,234	42	0,102
6/0	11,8	3	6,40	11	2,95	19	1,02	27	0,41	35	0,214	43	0,092
5/0	11,0	4	5,89	12	2,64	20	0,91	28	0,376	36	0,193	44	0,081
4/0	10,16	5	5,28	13	2,34	21	0,81	29	0,346	37	0,173	45	0,071
3/0	9,45	6	4,88	14	2,03	22	0,71	30	0,310	38	0,152	46	0,061
2/0	8,84	7	4,47	15	1,83	23	0,61	31	0,295	39	0,132	47	0,051
1/0	8,23	8	4,06	16	1,63	24	0,56	32	0,274	40	0,122	48	0,041
1	7,62	9	3,66	17	1,42	25	0,51	33	0,254	41	0,112	49	0,031
												50	0,025

Birmingham-Lehre, B W G.

Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm
0/4	11,53	2	7,21	7	4,57	12	2,77	17	1,47	22	0,71	27	0,41
0/3	10,80	3	6,58	8	4,19	13	2,41	18	1,24	23	0,64	28	0,36
0/2	9,65	4	6,05	9	3,76	14	2,11	19	1,07	24	0,56	29	0,33
0	8,64	5	5,59	10	3,40	15	1,83	20	0,89	25	0,51	30	0,30
1	7,62	6	5,16	11	3,05	16	1,65	21	0,81	26	0,46	31	0,25
												32	0,23

Amerikanische Brown & Sharpesche Lehre, B. & S. G.

Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm
0000	11,7	3	5,8	9	2,91	15	1,45	21	0,72	27	0,36	33	0,18
000	10,4	4	5,19	10	2,59	16	1,29	22	0,64	28	0,32	34	0,16
00	9,3	5	4,62	11	2,30	17	1,15	23	0,57	29	0,29	35	0,14
0	8,3	6	4,12	12	2,05	18	1,02	24	0,51	30	0,25	36	0,13
1	7,3	7	3,66	13	1,83	19	0,91	25	0,45	31	0,23	37	0,11
2	6,5	8	3,26	14	1,63	20	0,81	26	0,40	32	0,20	38	0,10

Statik.

(12) Zusammensetzung von Kräften in der Ebene. a) Zwei Kräfte: Parallelogramm (Dreieck) der Kräfte (in Abb. 5 z. T. punktiert), P_1, P_2 Seiten-, R_{12} Mittelkraft.

$$R_{12} = \sqrt{P_1{}^2 + P_2 - 2\,P_1\,P_2 \cos\alpha}$$
$$P_1 : P_2 : R_{12} = \sin\alpha_1 : \sin\alpha_2 : \sin\alpha$$

b) Drei und mehr Kräfte in einem Punkte (Abb. 4): Kräftezug, geschlossenes Kräftepolygon, Kräftevieleck. Die Mittelkraft schließt den Kräftezug; Abb. 5 zeigt die Stützkraft, welche der Mittelkraft gleich und entgegengesetzt ist. Zur Berechnung zerlegt man die Kräfte nach den rechtwinkligen Koordinatenachsen, addiert je die gleichgerichteten Seitenkräfte und setzt die Summen wieder zusammen:

$$R_{12\,..\,n} = \sqrt{\left[\sum P_n \cos\alpha_n\right]^2 + \left[\sum P_n \cos\beta_n\right]^2 + \left[\sum P_n \cos\gamma_n\right]^2}$$

$\cos(R, X) = \sum P_n \cos\alpha_n : R$; $\cos(R, Y) = \sum P_n \cos\beta_n : R$; $\cos(R, Z) = \sum P_n \cos\gamma_n : R$

c) Kräfte greifen nicht in einem Punkte an (Abb. 6): aus dem Kräftezug wie unter b (Abb. 5) R_{123} nach Größe und Richtung. Pol p in Abb. 7 beliebig, Polstrahlen R_1, (1, 2) usw.; parallel zu den Polstrahlen Seilzug in Abb. 6; die Wirkungslinie der Mittelkraft geht durch den Schnittpunkt von R_I und R_{IV}. R_{123} ist die der Mittelkraft gleiche, ihr entgegengesetzt gerichtete Stützkraft. — Parallele Kräfte, Abb. 8. Belastung des in a und b

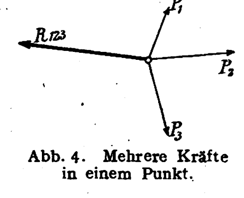


Abb. 4. Mehrere Kräfte in einem Punkt.

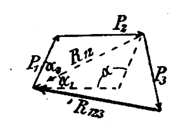


Abb. 5. Kräftezug.

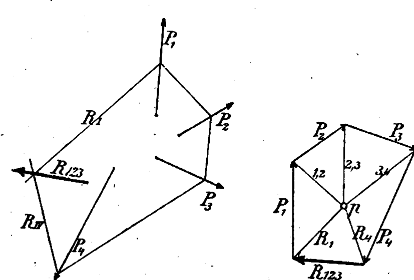


Abb. 6 u. 7. Kräfte in verschiedenen Punkten; Seilzug.

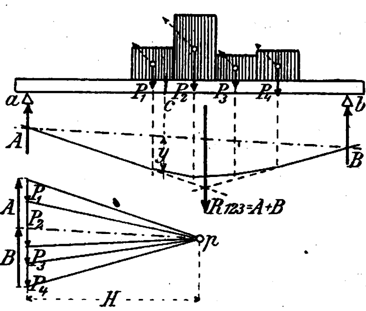


Abb. 8. Parallele Kräfte.

gelagerten Balkens prop. der schraffierten Fläche, Kräfte P_1, P_2 .... Kräftezug durch Aneinanderfügen der gleichgerichteten Käfte P_1 bis P_4, Mittelkraft $= \Sigma P$; p beliebig, Polstrahlen, danach Seilzug durch Parallele zu den Polstrahlen gezeichnet, Mittelkraft geht durch den Schnittpunkt des ersten mit dem letzten Strahl. Die Parallele durch p zur Schlußlinie des Seilzugs teilt ΣP in die Auflagedrucke $A + B$. Die vom Seilzug und dessen Schlußlinie umschriebene Fläche heißt Momentenfläche. Das Moment der Kräfte auf einer Seite des beliebigen Punktes c ist $H \cdot y$, worin y die Ordinate in der Momentenfläche unter c.

Zur Bestimmung des Mittelpunkts der Kräfte P wird die Mittelkraft für noch eine Richtung der Kräfte (in Abb. 8 punktiert) aufgesucht; der Schnittpunkt beider R ist der Kräftemittelpunkt und der Schwerpunkt der schraffierten Fläche.

(13) Trägheitsmomente sind Ausdrücke von der Form $J=\int r^2\,dm$ oder $\Sigma r^2 m$, worin dm Elemente, r ihre Abstände von der Achse sind, auf die J bezogen wird. Für das T. eines Körpers bedeutet dm Massenelemente, bei Flächen deren Elemente.

Äquatoriales T. einer ebenen Fläche, Achse in der Ebene, $J_x=\int y^2\,dF$, dF Flächenelemente.

Polares T. einer ebenen Fläche, bezogen auf einen Punkt der Ebene (Pol) $J_p=\int r^2\,dF$, r Abstand vom Pol. $J_p=J_x+J_y$, letztere bezogen auf zwei sich im Pol ⊥ schneidende Achsen.

T. für parallele Achsen: J_s bezogen auf die Schwerpunktachse, J (für Masse m) und J_x (für Fläche F), bezogen auf Achsen, die ‖ zu jener im Abstand a laufen: $J=J_s+ma^2 \cdot J_x=J_s+Sa^2$.

Widerstandsmoment $W=J:e$, J für eine Schwerpunktsachse, e größte Entfernung eines Flächenteils von der Achse.

Trägheitshalbmesser der Masse m oder Fläche $F: i=\sqrt{J/m}$ bzw. $\sqrt{J/F}$.

Literatur.

Müller-Breslau, Graphische Statik der Baukonstruktionen. Winnig, Grundlagen der Bautechnik für oberirdische Telegraphenlinien.

Äquatoriale Trägheitsmomente J_x und Widerstandsmomente W_x, Polare Trägheitsmomente J_p und Widerstandsmomente W_p.

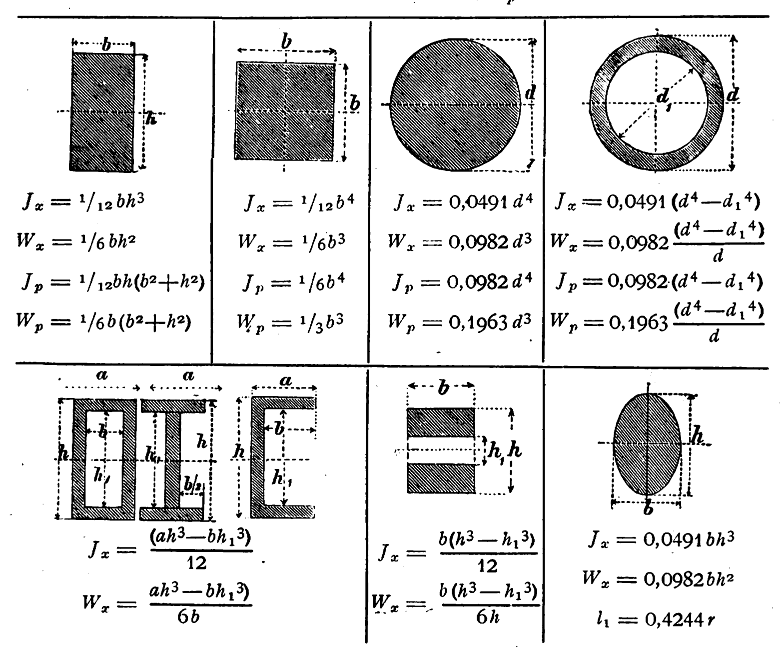


Abb. 9—16. Verschiedene Querschnitte.

Trägheitsmomente homogener Körper,
bezogen auf eine durch den Schwerpunkt gehende Achse.

Gestalt des Körpers	Schwerpunktachse	Trägheitsmoment
Parallelepiped, Kanten a, b, c	$\parallel a$	$^1/_{12} m (b^2 + c^2)$
Zylinder, Halbmesser r, Länge l	in der Zylinderachse	$^1/_2 mr^2$
	$\perp$ z. Zylinderachse	$m (^1/_{12} l^2 + ^1/_4 r^2)$
Hohlzylinder, Ring: äußerer Halbm. R, inn. r, Länge l	in der Ringachse	$^1/_2 m (R^2 + r^2)$
	$\perp$ zur Ringachse	$m \left(^1/_{12} l^2 + ^1/_4 \left\{ R^2 + r^2 \right\} \right)$
dünnwandige Röhre $R + r = 2r'$	in der Rohrachse	mr'^2
dünner Stab oder Röhre	$\perp$ zur Stabachse	$^1/_{12} ml^2$

Festigkeit.

(14) Begriffe. Spannung p = Kraft P : Fläche F. Festigkeitsgrenze ist die Spannung, welche hinreicht, den Zusammenhang der Teile aufzuheben; die ihr entsprechende Kraft heißt Bruchlast.

Dehnung ε ist das Verhältnis der Längenänderung Δl eines Stabes zur ursprünglichen Länge l, also $\varepsilon = \Delta l/l$. — Dehnungszahl α ist die Dehnung für die Spannung 1; $\varepsilon = \alpha p$. — Elastizitätsmaß $E = 1/\alpha$. — Für manche Stoffe ist $\Delta l/l = \alpha \cdot p$ (Hookesches Gesetz, gültig innerhalb der Elastizitätsgrenze). Allgemein ist $\Delta l/l = \alpha \cdot p^n$, worin n meist >1, manchmal auch <1.

Querzusammenziehung ε_q ist das Verhältnis der Verringerung δ des Durchmessers d zum Durchmesser $\varepsilon_q = \delta/d$; $\varepsilon/\varepsilon_q = m$ (Poissonsche Zahl) liegt für isotrope Körper zwischen 3 und 4, hat für Metalle den Wert 10/3.

Schubzahl β ist die Strecke, um die sich zwei um die Längeneinheit voneinander abstehende Flächenteilchen unter der Einwirkung der Schubspannung 1 kg/cm² gegeneinander verschieben.

Schubfestigkeit ist die Schubspannung, bei der sich zwei gegeneinander verschobene Querschnittsebenen eines Stabes trennen.

Elastizitätsgrenze ist die größte Spannung, bei der die bleibende Dehnung noch verschwindend klein ist; die zugehörige Kraft heißt Traglast.

Tragsicherheit = Verhältnis Elastizitätsgrenze / höchste Spannung.

Bruchsicherheit = Verhältnis Festigkeitsgrenze / höchste Spannung.
In die Rechnung einzuführen: P in kg*, l in cm, q in cm², p in kg*/cm², J in cm⁴, W in cm³, M und D in kg · cm.

(15) Formeln. Zug-, Druck- und Schubfestigkeit. Zulässige Belastung $P = q \cdot p$; p aus der Tafel S. 21 u. 22 zu entnehmen als p_z, p_k, p_s. Die Elastizitätsgrenze für Schub ist etwa $^4/_5$ des kleineren Wertes für Zug oder Druck; die Schubspannung τ ist für rechteck. Querschnitt $3\,p/2\,bh$ und für kreisförm. Querschnitt $= 16\,p/3\,\pi d^2$.

Biegefestigkeit. Biegemoment $M = P \cdot x$; P Last, x ihr Hebelarm. Im gefährlichen Querschnitt wird $P \cdot x$ ein Maximum; dies muß sein $\leqq W_p \cdot p_b$; W_p s. S. 18, p_b s. S. 22.

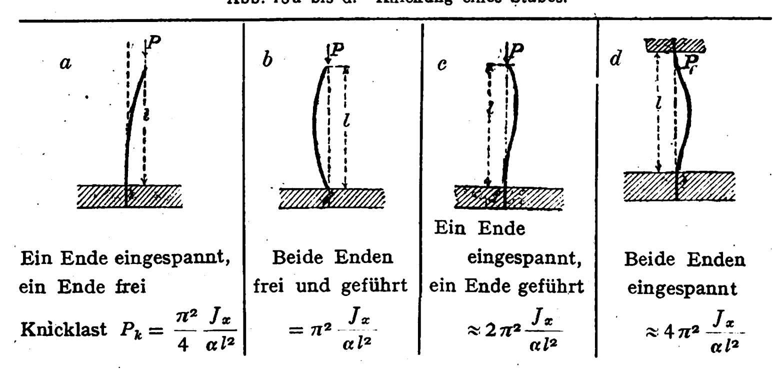
Einige wichtige Fälle von Biegebeanspruchung.

Art der Beanspruchung	M_{max}	Tragkraft P	Durchbiegung f
Abb. 17a	Pl	$\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P\alpha}{J_x} \frac{l^3}{3}$
Abb. 17b	$\frac{Pl}{2}$	$2\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P\alpha}{J_x} \frac{l^3}{8}$
Abb. 17c	$\frac{Pl}{4}$	$4\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P\alpha}{J_x} \frac{l^3}{48}$
auf beiden Seiten eingespannt	$\frac{Pl}{8}$	$8\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P\alpha}{J_x} \frac{l^3}{192}$
Abb. 17d.	$\frac{Pl}{8}$	$8\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P\alpha}{J_x} \frac{5l^3}{384}$
auf beiden Seiten eingespannt	$\frac{Pl}{12}$	$12\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P\alpha}{J_x} \frac{l^3}{384}$

Abb. 17a bis d. Biegung eines Stabes.

Knickfestigkeit.

Abb. 18a bis d. Knickung eines Stabes.



Eulersche Formeln: J_x ist das kleinste äquatoriale Trägheitsmoment des Querschnitts in cm⁴, l in cm, α in cm²/kg, P in kg/cm²; $P/F >$ Elastizitätsgrenze.

Die Eulersche Formel für den 2. Fall ist nur anwendbar, wenn $l:i \geqq 80$ (Gußeisen), 122 (Schweißeisen), 105 (Flußeisen), 90 (Flußstahl), 100 (Holz). Für kleinere Längen, als den Grenzwerten von l/i entspricht, sind die Tetmeyerschen Formeln (vgl. Hütte) zu benutzen.

Drehfestigkeit. Das Drehmoment $D = Pl \leqq W_p p_d$, l Hebelarm der drehenden Kraft, W_p S. 18. Der Verdrehungswinkel zweier um 1 mm voneinander abstehender Querschnitte eines runden Stabes ist $\vartheta = D\beta/J_p$, J_p s. S. 18, β S. 21.

(16) Festigkeitszahlen in kg/cm².

Stoff	α 10⁻⁸.	β 10⁻⁸.	Zug-festigkeit kg/cm²	Drähte aus	α 10⁻⁸.	Zug-festigkeit kg/cm²
Schweißeisen ‖ Sehnen	50,0	130	3300—4000	Eisen, blank gezogen		5600—7000
„ ⊥ Sehnen	50,0	130	2800—3500	„ geglüht	50	4000
Flußeisen	46,5	121	3400—5000	Beßemerstahl, blank		6500
Flußstahl	45,5	118	5000—20000	„ geglüht	46,5	4000—6000
Flußstahl, ungehärtet	45,5	118	10000 u. mehr	Tiegelstahl	46,5	9000—19000
„ gehärtet	45,5	118	17000 u. mehr	Zink	670	1900
Stahlguß	46,5	121	3500—7000 u. m.	Kupfer	77	4000
Gußeisen	95—133	250—345	1200—2400	Bronze		4600—7100
Kupfer, gewalztes Blech	87		2000—2300	Siliziumbronze		6500—8500
Messing, gegossen	125		1500	Doppelbronze		7600
Rotguß	111		2000	Phosphorbronze, blank		14000
Phosphorbronze			4000	„ geglüht		6300
Manganbronze	83—106		2900—3570	Messing	100	5000—6100
Aluminium	148	380	930—1000	Aluminium, kalt geschmiedet		2300—2700
Aluminiumbronze	83		4300—6200	Al.-Bronze, gegossen		6500
Zink, gewalzt	83—114		2050—2570	Blei	1400	170—220
Zinn	250		350			
Blei, weich	2000		125	Druckfestigkeit: Gußeisen		7000—8500
„ hart			300	Porzellan		4780
Glas	142		250	Biegefestigkeit: „		4200—5600
Holz, ‖ Faser	440—1100		750—1340	Die Bruchsicherheit wird im allgemeinen gewertet für		
Porzellan	140—190		1300—2000	Holz 10, Metall 6, Stein 12, Mauerwerk 20, Seil 3 bis 5.		

Spannungszahlen.

Die Zahlen der Tafel sind mit 100 zu multiplizieren, um kg*/cm² zu erhalten. Man nehme die zulässigen Spannungen unter:

a für ruhende Belastung.

b für Spannungen wechselnd zwischen 0 und dem Höchstwert.

c für Spannungen wechselnd zwischen einem negativen und einem positiven Höchstwert.

Stoff	zulässige Spannung in kg*/mm²														
	auf Zug p_z			Druck p_k		Biegung p_b			Schub p_s			Drehung p_d		
	a	*b*	*c*	*a*	*b*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*
Schweißeisen . . .	9	6	3	9	6	9	6	3	7,2	4,8	2,4	3,6	2,4	1,2
Flußeisen	11	7	3,5	11	7	11	7	3,5	8,4	5,6	2,8	7,2	4,8	2,4
Flußstahl	14	9	4,5	14	9	14	9	4,5	11	7,2	3,6	11	7	3,5
Tiegelgußstahl geh. .							43							
Gußeisen.	3	2	1	9	6	4,5	3	1,5	3	2	1	1,5	1	0,5

Zusammengesetzte Festigkeit. Die zulässige Beanspruchung ergibt sich für: 1. Zug (Druck) und Biegung: $M/W + p \leqq p_z$ oder p_k. Bei starker lotrechter Belastung (Knickgefahr) empfiehlt sich $M/W - p \leqq p_z$ oder p_k. 2. Zug (Druck, Biegung) und Drehung: $0{,}35\,p + 0{,}65\,\sqrt{p^2 + 2{,}4\,x^2\,\tau^2} \leqq p_z$ oder p_k oder p_b. x ist für Zug p_z/p_d, für Druck p_k/p_d, für Biegung p_b/p_d; hierin ist $p = P/q$; p_z; p_k, usw. s. obige Tabelle; M s. S. 19 u. 20; W s. S. 18.

Eine neue Formel von Natalis[1]) gilt für das ganze Bereich; es ist

$$P_k = k_v F \cdot \frac{1 + A}{1 + A + A^2}, \qquad A = \frac{k_0}{\pi^2} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{l}{i}\right)^2$$

k_0 Druckfestigkeit an der Bruchgrenze in kg/cm², l Schublänge in cm, $i = \sqrt{J/F}$ in cm.

(17) Dichte verschiedener Körper.

Metalle und Legierungen.

Aluminium	2,6—2,7	Magnesium	1,7
Blei	11,2—11,4	Mangan	7,4
Bronze (7,9—14 v H Zinn)	7,4—8,9	Messing	8,3—8,7
Deltametall	8,6	Neusilber, Argentan, Nickelin usf.	8,4—8,7
Eisen, reines	7,86	Nickel	8,6—8,9
Flußeisen und Flußstahl	7,85	Phosphorbronze	8,8
Schmiedeeisen	7,82	Platin	21,5
Schweißeisen	7,8	Quecksilber 0°	13,6
Schweißstahl	7,86	Silber	10,5
Weißer Guß	7,6—7,7	Siliziumbronze	8,9
Grauer Guß	7,0—7,1	Tantal	16,5
Glockenmetall	8,81	Weißmetall	7,1
Gold	19,3	Wismut	9,8
Kadmium	8,6	Wolfram	19,1
Kanonengut	8,44	Zink	6,9—7,2
Kupfer, gegossen	8,83—8,92	Zinn	7,3
Draht, geh. od. gewalzt .	8,94		
elektrolyt.	8,88—8,95		

[1]) Dingl, Polyt. J. Bd. 334. S. 69, 1919.

Verschiedene Materialien.

Asbest	2,1—2,8	Anthracit	1,4—1,7
Asbestpappe	1,2	Retortenkohle	1,9
Asphalt	1,1—1,5	Koks im Stück	1,4
Bernstein	1,0—1,1	Holzkohle im Stück	1,5
Beton	1,80—2,45	Kohlenstäbe	1,6
Bleioxyd, -glätte	9,3—9,4	Kolophomin	1,07
Bleisuperoxyd	8,9	Kork	0,24
Braunstein	3,7—4,6	Kupfervitriol	2,3
Chlornatrium	2,16	Linoleum	1,15—1,30
Eis von 0°	0,917	Marmor	2,5—2,9
Elfenbein	1,8—1,9	Mennige	8,6—9,1
Fette	0,92—0,94	Papier	0,70—1,15
Flachs, lufttrocken	1,5	Paraffin	0,9
Gips, gegossen	0,97	Pech	1,1
gebrannt	1,81	Porzellan	2,3—2,5
Glas	2,5—2,7	Salmiak	1,5—1,6
Glimmer	2,7—3,2	Schiefer	2,65
Guttapercha	0,97	Schmirgel	4,0
Hanf, lufttrocken	1,5	Schwefel	1,93—2,07
Hartgummi	1,15	Serpentin	2,4—2,7
Harz	1,07	Speckstein	2,6—2,8
Kalziumkarbid	2,26	Stearin	1,0
Kautschuk, nicht vulkan.	0,92—0,96	Vulkanfiber	1,28
Kohlenstoff		Wachs	0,96
Graphit	1,9—2,3	Zement, Portland-	2,7—3,0
Braunkohle	1,2—1,4	Ziegel	1,4—2,0
Steinkohle	1,2—1,5	Zinkvitriol	2,02

Flüssigkeiten.

Äther	0,74	Petroleum	0,8—0,9
Alkohol	0,79	Rizinusöl	0,97
Amylazetat	0,89	Schwefelkohlenstoff	1,29
Benzin	0,7	Spiritus	0,84
Benzol	0,90	Steinkohlenteer	1,20
Öle, Fette	0,91—0,94	Terpentinöl	0,87

Wässerige Lösungen von Säuren, Alkalien und Salzen.

Dichte bei 15° C	Schwefelsäure	Salpetersäure	Salzsäure	Kalilauge	Natronlauge	Chlornatrium	Kupfervitriol	Zinkvitriol
	100 Gewichtsteile der Lösung enthalten Gewichtsteile:							
	H_2SO_4	HNO_2	HCl	KHO	$NaHO$	$NaCl$	$CuSO_4 + 5\,H_2O$	$ZnSO_4 + 7\,H_2O$
1,05	7,5	8,2	10	6,1	4,3	6,9	7,8	8,5
1,10	14	17	20	12	8,7	14	15	17
1,15	21	25	30	17	13	20	28	24
1,20	27	32	40	22	18	26		31
1,25	33	40		27	22			37
1,30	39	47		31	27			44
1,4	50	65		39	37			55
1,5	60	91		47	46			
1,6	69			55	56			

Wärme.

(18) Temperaturen. Siedetemperatur T des Wassers bei verschiedenen Barometerhöhen (b_0):

$b_0 =$	740	745	750	755	760	765	770
$T =$	99,3	99,4	99,6	99,8	100,0	100,2	100,4.

Umrechnung eines Gasvolumens von der Temperatur $t°$ C und dem Druck b mm Quecksilber auf 0° und 760 mm:

$$\text{Volumen bei } 0° = \text{Volumen bei } t° \times \frac{273}{273+t} \cdot \frac{b}{760}$$

Schmelz- und Siedepunkte.

Metalle und Legierungen	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C
Aluminium	658	1800
Blei . . .	327,4	1525
Eisen, rein.	1600	2450
Roheisen	1100—1200	
Stahl.. .	1300—1400	
Gold . . .	1063	2530
Iridium . .	2340	
Bronze . .	etwa 900	
Deltametall	950	
Messing . .	etwa 900	
Kupfer . .	1083	2310
Magnesium	651	1120
Nickel . .	1460	2325
Platin . .	1764	2400
Quecksilber	—38,9	357
Silber . .	960,5	1950
Tantal . .	2900	
Wolfram .	3000	3710
Zink . . .	419,4	918
Zinn . . .	231,8	2270
Schwefel .	119	444,5
Selen. . .	217	690
Chlornatrium	801	

leicht schmelzbare Legierungen	Gewichtsteile Cd	Sn	Pb	Bi	Schmelzpunkt °C
Lipowitz .	3	4	8	15	60—65,5
Wood . .	1	1	2	4	65,5—70
Rose . . .	—	4	4	8	95

Organische Körper	Schmelzpunkt	Siedepunkt
Alkohol		78,5
Amylacetat zur Hefnerlampe .		138
Äther.		35
Benzin		90–110
Ligroin		110–120
Paraffin, weich	38—52	350–390
„ hart	52—56	390–430
Schmalz, Talg, Wachs . . .	40—65	
Terpentinöl		160
Wallrat	44—44,5	

Gase	Siedepunkt
Schweflige Säure	—10
Ammoniak	—33
Kohlensäure	—78
Sauerstoff	—183
Kohlenoxyd	—190
Stickstoff	—196
Wasserstoff	—253
Helium	—268

(19) Inneres Wärmeleitungsvermögen einiger Körper,

bezogen auf cm², cm, °C, cal.

Aluminium .	0,35	Kohle . . .	0,0003 —0,0004	Quecksilber .	0,02
Antimon . .	0,04			Schiefer . . .	0,0008
Blei	0,08	Kupfer . .	0,7—1,0	Silber . . .	1,1
Eisen. . . .	0,16	Luft . . .	0,00005	Wismuth . .	0,017
Glas	0,002	Marmor . .	0,001—0,002	Woodsches Metall . .	0,03
Graphit . . .	0,16	Messing . .	0,2—0,3	Zinn	0,14
Hartgummi .	0,0002	Neusilber .	0,07—0,10	Zink	0,30
Holz	0,0003	Paraffin . .	0,0001		
Kadmium . .	0,21	Porzellan .	0,002		



(20) Spezifische Wärme fester und flüssiger Körper.

Äther	0,56	Platin	0,03
Alkohol	0,58	Porzellan	0,17
Aluminium	0,21	Quarz	0,19
Blei, fest	0,031	Quecksilber	0,033
flüssig	0,040	Roses Metall	0,04
Bleiglätte	0,05	Schwefel	0,17
Chloroform	0,23	Schwefelkohlenstoff	0,24
Eis	0,5	Schwefelsäure, konz.	0,33
Eisen bei 0°	0,112	Silber	0,055
100°	0,114	Tantal	0,036
300°	0,127	Terpentinöl	0,42
Stahl 20—100°	0,118	Wismut	0,029
Schmiedeeisen	0,108	Zink	0,092
Glas	0,19	Zinn	0,052
Gold	0,03	Woods Metall	0,04
Kohle, Gaskohle	0,2—0,3		
Holzkohle	0,16—0,20	Atmosphärische Luft,	
Graphit 0°	0,15	Kohlensäure, Sauerstoff	
200°	0,30	und Stickstoff bezogen	
Kupfer	0,091	auf gleiche Masse Wasser	
Magnesium	0,25	bei konstantem Druck	0,23
Messing	0,093	bei konstant. Volumen	0,17
Nickel	0,11		

(21) Verdampfungswärme bei 760 mm Druck.

Äther	90	Quecksilber	68
Alkohol	210	Schwefel	362
Chloroform	58	Wasser	539

(22) Ausdehnungskoeffizienten.
Lineare Ausdehnungskoeffizienten fester Körper.

Aluminium	$22 \cdot 10^{-6}$	Kupfer	$17 \cdot 10^{-6}$
Blei	$28 \cdot 10^{-6}$	Messing	$19 \cdot 10^{-6}$
Bronze	$18 \cdot 10^{-6}$	Neusilber	$18 \cdot 10^{-6}$
Eisen und Stahl	$12 \cdot 10^{-6}$	Nickel	$13 \cdot 10^{-6}$
Glas	6 bis $10 \cdot 10^{-6}$	Platin	$9 \cdot 10^{-6}$
Graphit	$8 \cdot 10^{-6}$	Platin-Iridium	$9 \cdot 10^{-6}$
Hartgummi	$80 \cdot 10^{-6}$	Porzellan	$5 \cdot 10^{-6}$
Holz, quer	30 bis $60 \cdot 10^{-6}$	Schwefel	$80 \cdot 10^{-6}$
„ längs	3 bis $10 \cdot 10^{-6}$	Silber	$19 \cdot 10^{-6}$
Invar 64 Fe, 36 Ni	$2 \cdot 10^{-6}$	Zinn	$23 \cdot 10^{-6}$
Kohle, Gaskohle	$5 \cdot 10^{-6}$	Zink	$30 \cdot 10^{-6}$

Kubische Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten und Gasen.

Atmosphärische Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlensäure	0,0037
Äther, flüssig	0,0021
Alkohol „	0,0012
Quecksilber	0,00018
„ in Glas, scheinbar	0,00015
Wasser 4—25°, Mittel	0,0001

Zweiter Abschnitt.

Magnetismus und Elektrizität.

Magnetismus.

(23) Magnetische Stoffe. Am stärksten magnetisierbar sind: Eisen, Stahl, in geringerem Maße Magneteisenstein (Fe_3O_4), Nickel, Kobalt sowie die Legierungen von Kupfer mit Manganaluminium und Manganzinn (H e u s l e r). Zwar zeigen alle diese Materialien auch nach Aufhören der magnetisierenden Kraft sogenannten „remanenten" Magnetismus, doch verschwindet dieser leicht wieder bei den „magnetisch weichen" Materialien (reines Eisen, Eisensiliziumlegierungen u. dgl.), schwerer bei den übrigen „magnetisch harten", am schwersten bei bestimmten Stahlsorten, die sich daher besonders zu permanenten Magneten eignen (25, 32).

(24) Verteilung des Magnetismus. Bei jedem Magnet scheint die Wirkung nach außen von zwei verhältnismäßig kleinen Stellen nahe den Enden auszugehen, den Polen (ihre Verbindungslinie = magnetische Achse), während der Teil in der Mitte zwischen den Polen, die Indifferenzzone, nach außen fast keine Wirkung ausübt. Bei vielen Berechnungen darf man sich einen Magnet durch zwei starr verbundene punktförmige Magnetpole ersetzt denken, in denen der ganze freie Magnetismus konzentriert ist. Der Polabstand beträgt etwa 5/6 der Länge eines stabförmigen bzw. des Durchmessers eines scheiben- oder ringförmigen Magnetes, hängt jedoch noch von der Gestalt des Magnetes und der Stärke der Magnetisierung ab.

Bei einem Rotationsellipsoid von der Länge l ist nach dieser Definition (Fernwirkung) der Polabstand $= 0{,}775\, l$ (vgl. z. B. G a n s, ETZ 1911, S. 529; dort sind auch die Bedingungen für die Zulässigkeit der Annahme punktförmiger Pole diskutiert). Nach einer zweiten, weniger gebräuchlichen Definition wird der Pol als Schwerpunkt des freien Magnetismus betrachtet; der Polabstand nach dieser Definition ist im allgemeinen kleiner, z. B. beim Rotationsellipsoid nur $0{,}67\, l$.

Die Verteilung des Magnetismus im Innern des Magnetes ist der des freien Magnetismus entgegengesetzt; an den Polen hat der im Innern vorhandene Magnetismus ein Minimum, in der Indifferenzzone ein Maximum.

(25) Herstellung der Magnete. Das beste Material ist harter Stahl mit 0,7 bis 1,2% C und einem Zusatz von 3—6% W, Cr oder Mo; Härtungstemperatur 800° bis 850°. Starke Magnete setzt man aus dünneren Stäben oder Hufeisen zusammen, die vorher einzeln magnetisiert worden sind.

Die zu magnetisierenden Stahlstäbe oder -hufeisen werden an die Pole eines kräftigen hufeisenförmigen Stahl- oder Elektromagnetes gelegt und ein wenig hin- und hergezogen, ein Stab auch um seine Längsachse gedreht. Vor dem Abreißen legt man dem Hufeisen einen Anker vor. Gerade Stäbe magnetisiert man am besten in einer von einem starken Strom durchflossenen Spule. Statt einer langen Spule, die den ganzen Stab bedeckt, genügt zur Not auch eine kurze Spule, die man über den Stab oder das Hufeisen der Länge nach wegzieht.

Haltbare Magnete. Im allgemeinen nimmt die Stärke permanenter Magnete schon bei längerem Lagern, besonders aber beim Gebrauch, infolge kleiner Temperaturschwankungen und Erschütterungen auch bei sorgfältiger Behandlung ab. Um dies möglichst zu vermeiden, behandelt man sie in folgender Weise (Alterung): Vor oder nach dem ersten Magnetisieren werden sie für mehrere Stunden in den Dampf von siedendem Wasser gebracht; nach dem Abkühlen magnetisiert man sie wieder und nimmt nun eine Reihe von kürzeren Erwärmungen und Abkühlungen vor. Sodann werden sie kräftigen Erschütterungen (Schlägen mit einem Holzhammer u. dgl.) ausgesetzt (Strouhal und Barus). Dasselbe soll sich auch durch eine Entmagnetisierung um etwa $^1/_{10}$ erreichen lassen (Curie).

Temperaturkoeffizient permanenter Magnete. Das Moment gealterter Magnete nimmt bei mäßigen Temperaturschwankungen nicht mehr dauernd ab, wohl aber ändert es sich mit der Temperatur: es sinkt mit steigender Temperatur und nimmt mit fallender wieder zu. Die Änderung (der Temperaturkoeffizient) beträgt im allgemeinen 0,02% bis 0,06% für 1° C. Magnete aus reinem, bei 1100° gehärtetem Kohlenstoffstahl mit etwa 1,4% *C* besitzen keinen Temperaturkoeffizient, aber auch nur geringes magnetisches Moment (Gumlich, Wiss. Abh. der Reichsanstalt IV, H. 3, S. 343).

Äußerungen der magnetischen Kraft.

(26) Magnetische Verteilung. Nähert man einem Magnet ein Stück Eisen oder Stahl, so wird das letztere ebenfalls zu einem Magnet; jeder Pol des ersteren Magnetes erzeugt in den ihm zunächst liegenden Teilen des genäherten Körpers einen ihm ungleichnamigen Pol, in den entfernteren Teilen einen gleichnamigen Pol.

(27) Tragkraft der Magnete. Ein Magnetpol hat die Eigenschaft, weiches Eisen anzuziehen und mit einer gewissen Kraft festzuhalten; diese „Tragkraft" des Magnetes wird gemessen durch das Gewicht, das gerade ausreicht, um ein angezogenes und festgehaltenes Stück Eisen vom Magnetpol loszureißen. Zwischen der erreichbaren Tragkraft P und der Masse m des Magnetes besteht die Beziehung

$$P = a \cdot \sqrt[3]{m^2} \text{ Kilogramm-Kraft,}$$

worin m in kg gemessen wird (D. Bernoulli). Die Zahl a ist für einen Pol = 10, für zwei Pole = 20 (ungefähr). Die Tragkraft ist im wesentlichen der Polfläche proportional, s. (101,b).

Allgemeiner: Treten vom Magnet zum Anker auf 1 cm² $\mathfrak{B}$ Kraftlinien senkrecht über, so ist nach Maxwell bei S cm² Polfläche die Anziehung P zwischen Magnet und Anker gegeben durch

$$P = \frac{S \cdot \mathfrak{B}^2}{8\pi} \text{ Dyn} \approx \frac{S \cdot \mathfrak{B}^2}{25000} \text{ Gramm-Kraft.}$$

(28) Anziehung und Abstoßung. Eisen und nicht magnetisierter Stahl werden von beiden Polen angezogen (26). — Für Magnetpole untereinander gilt der Satz: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Gesetze der magnetischen Fernewirkung. Die Kraft, mit welcher ein Magnetpol einen anderen anzieht bzw. abstößt, ist nach der Verbindunglinie der beiden Pole gerichtet und unabhängig von der Natur des zwischenliegenden Mittels, wenn das letztere unmagnetisch ist. Sie ist proportional den wirkenden Magnetismen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung der Pole voneinander:

$$P = \frac{\mathfrak{m}_1 \cdot \mathfrak{m}_2}{r^2}.$$

Maß des Magnetismus eines Poles. Die Einheit des Magnetismus besitzt also derjenige Pol, der einen gleichstarken, 1 cm entfernten un-

gleichnamigen Pol mit der Einheit der Kraft (Dyne) anzieht, d. i. nahezu mit derselben Kraft, mit der die Masse von 1 mg von der Erde angezogen wird.

Magnetisches Moment. Praktisch kommen niemals vereinzelte Pole, sondern immer Magnete, d. i. Paare von ungleichnamigen Polen vor. Die Pole eines Magnetes sind in der Regel gleich stark; besitzt der eine Nordmagnetismus von der Stärke $\mathfrak{m}$, also $+\mathfrak{m}$, so hat der andere Südmagnetismus von der Stärke $\mathfrak{m}$, d. i. $-\mathfrak{m}$. Das Produkt aus dem Magnetismus eines Poles in den Polabstand heißt das magnetische Moment des Magnetes. Polabstand s. (24).

Bei beliebiger Verteilung der magnetischen Mengen $d\mathfrak{m}$ gilt allgemein für das magnetische Moment $\mathfrak{M} = \int \mathfrak{r} \cdot d\mathfrak{m}$, wo $\mathfrak{r}$ den Radiusvektor von einem beliebigen Raumpunkt nach dem Punkt $d\mathfrak{m}$ bezeichnet. Die einzelnen magnetischen Momente sind vektoriell zusammenzusetzen bzw. in Komponenten $\mathfrak{M}_x = \int x \, d\mathfrak{M}$ usw. zu zerlegen.

Wirkung eines Magnetes auf einen anderen. Ein Magnetstab (vom Moment $\mathfrak{M}$) liege fest an einer Stelle einer wagerechten Ebene, in der eine Magnetnadel (vom Moment $\mathfrak{M}'$), welche z. B. auf einer Spitze gelagert ist, sich drehen kann.

Erste Hauptlage (Gauß). Die Nadel liegt in der Verlängerung der magnetischen Achse des Stabes und steht senkrecht zur letzteren.

$$\text{Drehmoment } D_1 = 2 \cdot \frac{\mathfrak{M} \cdot \mathfrak{M}'}{r^3} \text{ CGS.}$$

Zweite Hauptlage (Gauß). Die Nadel liegt mit ihrer magnetischen Achse in der Senkrechten auf der Mitte der magnetischen Achse des Stabes.

$$\text{Drehmoment } D_2 = \frac{\mathfrak{M} \cdot \mathfrak{M}'}{r^3} \text{ CGS.}$$

Zwischenlagen. Bildet die Nadel mit den obigen Richtungen den Winkel φ, so sind die betreffenden Ausdrücke noch mit $\cos\varphi$ zu multiplizieren. Macht der Stab mit r den Winkel ψ, so kann man ihn ersetzt denken durch zwei Stäbe, von denen der eine mit dem Moment $\mathfrak{M}\cos\psi$ aus der ersten, der andere mit dem Moment $\mathfrak{M}\sin\psi$ aus der zweiten Hauptlage wirkt.

Diese Gesetze gelten nur auf Entfernungen, die so groß sind, daß die Quadrate der Magnetlängen gegen das Quadrat des Abstandes der Magnete voneinander verschwinden.

Maß des magnetischen Momentes. Ein Magnet vom Moment $\mathfrak{M} = 1$ übt in der zweiten Hauptlage aus der (großen) Entfernung r auf einen anderen, gleichstarken Magnet ($\mathfrak{M}' = 1$) das Drehmoment $1/r^3$ aus, welches also so groß ist, als wenn an dem letzteren Magnet im Abstand 1 cm von der Drehachse ein Zug gleich der Kraft $1/r^3$ wirkte.

Spezifischer Magnetismus ist der Quotient aus dem magnetischen Moment durch die Masse des Magnetes.

Der spezifische Magnetismus, welcher nicht nur vom Material, sondern in hohem Maße auch von der Gestalt des Magnetes abhängt, ist bei guten Stahlmagneten etwa = 40 CGS, bei besonders gestreckter Form bis 100 CGS. Elektromagnete aus sehr gutem weichen Eisen erreichen einen spezifischen Magnetismus von 200 CGS.

Stärke der Magnetisierung $\mathfrak{J}$ ist der Quotient aus dem magnetischen Moment durch das Volumen des Magnets, also das Moment für das Kubikzentimeter oder die Polstärke für das Quadratzentimeter des Magnetes $\mathfrak{J} = \mathfrak{M}/V = \mathfrak{m}\,l/ql = \mathfrak{m}/q$. Werte nach der Formel in (30) und der Tabelle S. 35 zu berechnen.

(29) Magnetisches Feld und Potential; magnetische Arbeit. Die Umgebung eines Magnetpoles, eines Magnetes oder einer Vereinigung von Magneten heißt deren magnetisches Feld. Man denkt sich das Feld durchzogen von Kraftlinien,



welche für jeden Punkt des Feldes die Richtung der resultierenden magnetischen Kraft angeben; die Linien nehmen im allgemeinen ihren Weg strahlenartig von einem Pol zum nächsten ungleichnamigen Pol.

Wird ein Pol von der Stärke $\mathfrak{m}$ durch das Feld $\mathfrak{H}$ auf irgendeinem Wege s von einem Punkt P_1 zu einem Punkt P_2 geführt, so ist die dabei aufzuwendende Arbeit $= \mathfrak{m}\int_{P_1}^{P_2}(\mathfrak{H}, ds) = \mathfrak{m}\int_{P_1}^{P_2}\mathfrak{H}_s ds$, wenn $\mathfrak{H}_s$ die Projektion von $\mathfrak{H}$ auf das jedesmalige Wegelement ds bedeutet.

Der Integralwert wird Null für jeden geschlossenen Weg, der keine stromdurchflossene Stellen enthält, $\oint \mathfrak{H}\, ds = 0$, und $0{,}4\,\pi m I$ für einen Integrationsweg, der mit $m I$ Amperewindungen verkettet ist (rot $\mathfrak{H} = 4\,\pi\, i/10$; i in A/cm²).

Das magnetische Feld $\mathfrak{H}$ im Innern einer langen Spule, welche auf die Längeneinheit K Windungen enthält ($K = m/l$) und vom Strome I A durchflossen wird, ist daher $0{,}4\,\pi K I$.

In den nicht von Strömen durchflossenen Teilen des Feldes lassen sich die Komponenten von $\mathfrak{H}$ als Ableitungen eines Potentials ψ darstellen, so daß:

$$\mathfrak{H}_x = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad \mathfrak{H}_y = -\frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad \mathfrak{H}_z = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \quad \text{oder} \quad \mathfrak{H} = -\operatorname{grad}\psi.$$

Starke und dabei gleichmäßige Felder erhält man zwischen den Polen eines Elektromagnetes mit ziemlich breiten und nahe aneinander gerückten Polflächen oder, was auf dasselbe hinauskommt, im schmalen Schlitz eines Eisen-Rings oder -Vierecks, dessen Wickelung von einem Strom durchflossen wird. Die Beziehung zwischen Magnetisierungsstrom und Feldstärke muß zunächst empirisch ermittelt und in Kurvenform aufgetragen werden; dann genügt bei gewissen Vorsichtsmaßregeln (Gans und Gmelin, Ann. d. Phys. (4) Bd. 28, S. 925; 1909) zur Herstellung eines bestimmten Feldes die Anwendung eines bestimmten Magnetisierungsstromes. Schwächere, gleichmäßige Felder liefert die Mitte einer gleichmäßig bewickelten, relativ langen Spule.

Um den Verlauf der Kraftlinien in einem magnetischen Feld zu untersuchen, kann man sich einer kurzen Magnetnadel bedienen, die sich um zwei zur magnetischen Achse senkrechte Achsen drehen kann; sie stellt sich überall in die Richtung der Kraftlinien ein. Die Richtung, nach welcher der Nordpol der kleinen Magnetnadel zeigt, rechnen wir als positive Richtung der Kraftlinien. — Oder man bringt in das zu untersuchende Feld eine Papier- oder Glastafel, die mit Eisenfeilspänen bestreut ist; die Eisenteilchen ordnen sich bei leisem Klopfen in der Richtung der Kraftlinien an; um sie in ihrer Stellung festzuhalten, bestäubt man sie mit Gummi- oder Schellacklösung.

Wirkung auf eine Magnetnadel. Ist die Stärke des magnetischen Feldes $\mathfrak{H}$, das magnetische Moment der Nadel $\mathfrak{M}$, und schließt die magnetische Achse der letzteren mit der Richtung der Kraftlinien den Winkel φ ein, so erfährt die Nadel ein Drehmoment von der Größe $\mathfrak{H}\cdot\mathfrak{M}\cdot\sin\varphi$. Die Schwingungsdauer einer Magnetnadel im Magnetfeld ist $\pi\sqrt{J/\mathfrak{H}\mathfrak{M}}$ s. (J = Trägheitsmoment).

Als Maß der Stärke des magnetischen Feldes [Messung s. (219)] gilt die Anzahl der Kraftlinien auf 1 cm². Im magnetischen Feld von der Stärke 1 Gauß (eine Kraftlinie auf 1 cm²) erfährt eine Magnetnadel vom Moment 1, deren magnetische Achse senkrecht zu den Kraftlinien steht, das Drehmoment 1.

(30) Magnetische Induktion (magnetische Dichte). Die magnetische Kraft oder die Stärke des magnetischen Feldes $\mathfrak{H}$ an irgendeiner Stelle erzeugt die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$. Wirkt $\mathfrak{H}$ auf einen magnetischen Körper, so ist im Innern des Magnetes

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\,\pi\,\mathfrak{J}.$$

$\mathfrak{H}$ und $4\pi\mathfrak{J}$ haben zwar im allgemeinen verschiedene Richtung, so daß sie als Vektoren zu addieren sind, in dem hier wichtigsten Falle, im Eisen, gilt jedoch, wenn man von der Hysterese absieht, die obige einfache Formel. Ferner ist

$$\frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \mu \qquad \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}} = \varkappa \qquad \mu = 1 + 4\pi\varkappa.$$

μ heißt Permeabilität oder Durchlässigkeit,
$\varkappa$ „ Suszeptibilität oder Aufnahmevermögen.

Für Luft ist μ sehr nahe $= 1$, $\varkappa = 0$.

Der Pol von der Stärke 1 sendet 4π Kraftlinien, der Magnet von der Magnetisierungsstärke $\mathfrak{J}$ sendet $4\pi\mathfrak{J}q$ Kraftlinien aus; q = Querschnitt.

Die Linien $\mathfrak{B}$ bilden in sich geschlossene Bahnen. Umgrenzt man auf einer beliebigen Fläche, die die Linien $\mathfrak{B}$ schneidet, einen kleinen Teil durch eine in sich geschlossene Kurve, so bilden die durch diese Kurve gehenden Linien $\mathfrak{B}$ eine Induktionsröhre. Diese kann sich durch beliebiges Material, z. B. teilweise durch Eisen, teilweise durch Luft, erstrecken, wobei sich im allgemeinen ihr Querschnitt q ändert, und schließt sich in sich selbst. Eine solche Röhre enthält in jedem Querschnitt gleich viele Induktionslinien $\mathfrak{B}$ ($q_1\mathfrak{B}_1 = q_2\mathfrak{B}_2$), aber verschieden viele Feldlinien $\mathfrak{H}$. Für letztere gilt der Satz vom Linienintegral der magnetischen Feldstärke (29) $0{,}4\,\pi\, m\, I = \oint \mathfrak{H}\, d\, l$, wenn man das Integral auf eine beliebige in sich geschlossene Bahn erstreckt, die den Leiter m mal umschlingt, und I in Ampere ausdrückt. Der Stoff, durch den die Bahn führt (ob Eisen, Luft, Holz usw.), ist dabei ganz gleichgültig. In der Technik werden die Induktionslinien vielfach Kraftlinien, der Induktionsfluß Kraftfluß, in der Physik die Feldlinien häufig Kraftlinien genannt.

(31) Magnetisierungskurve. Stellt man den Zusammenhang zwischen der magnetisierenden Kraft $\mathfrak{H}$ und der erzeugten Induktion $\mathfrak{B}$ oder der Magnetisierungsstärke $\mathfrak{J}$ durch eine Kurve dar, so erhält man ein Bild, wie es Abb. 19 zeigt. Vom unmagnetischen Zustand im Nullpunkt der Koordinaten ausgehend wächst $\mathfrak{B}$ oder $\mathfrak{J}$ bei schwachen magnetisierenden Kräften erst ganz langsam, dann bedeutend rascher, schließlich wieder immer langsamer. Läßt man in irgendeinem Punkte dieser Kurve, z. B. bei a, die magnetisierende Kraft wieder abnehmen, so entsprechen den neuen Werten andere $\mathfrak{B}$ oder $\mathfrak{J}$ als beim Zunehmen des Stromes. Ist die magnetisierende Kraft Null geworden, so haben $\mathfrak{B}$ oder $\mathfrak{J}$ noch ganz erhebliche Werte, um dann aber in ähnlicher Weise abzufallen, wie sie vorher im steilsten Teil der Kurve angestiegen waren.

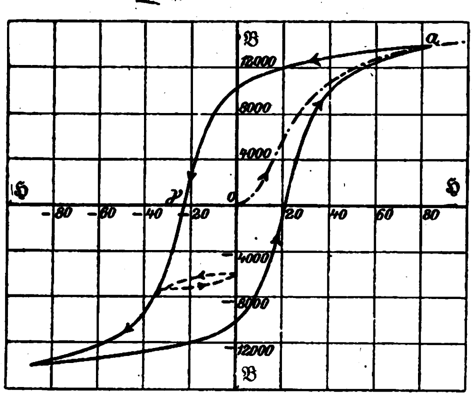
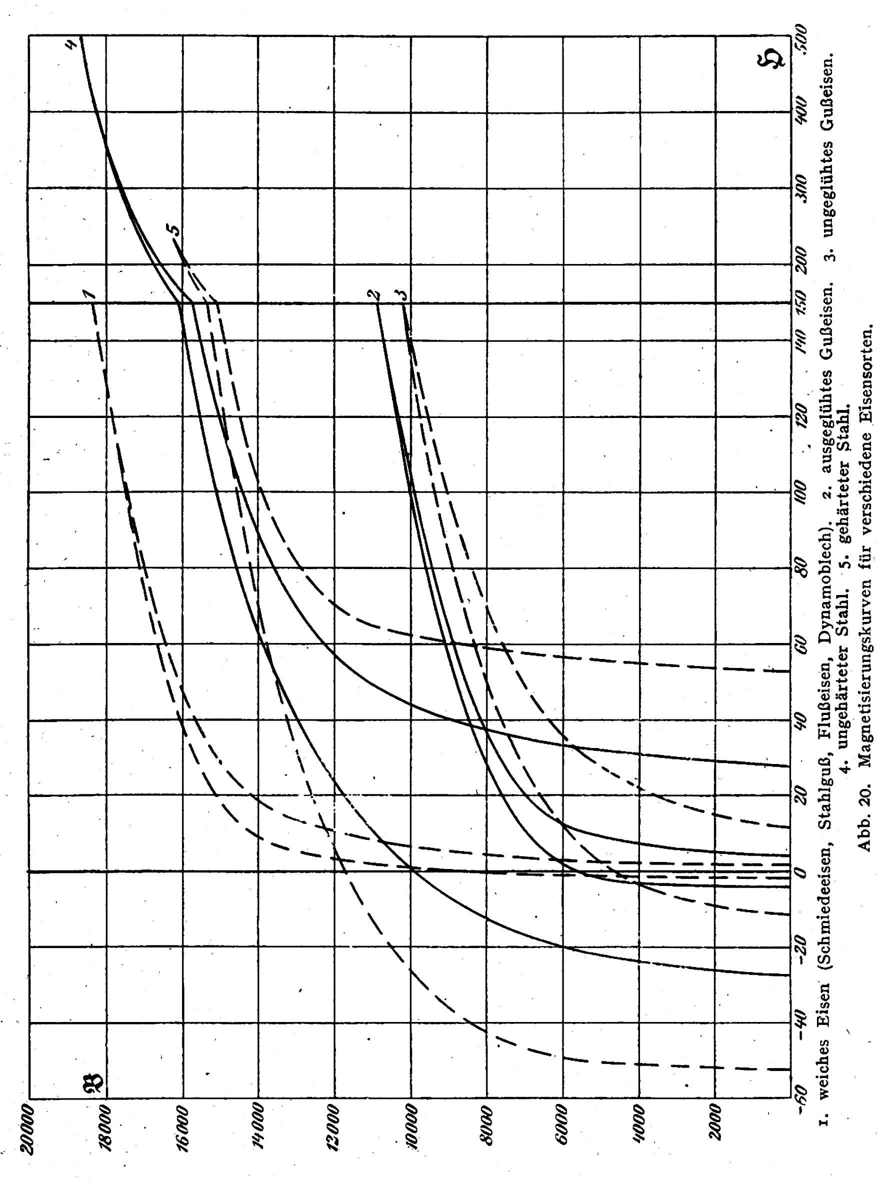


Abb. 19. Magnetisierungskurve (Hystereseschleife).

Die Ordinate zu O (in der Abb. etwa 10000) heißt Remanenz. Die Abszisse $O\gamma$ heißt Koerzitivkraft (Hopkinson); sie bezeichnet diejenige Feldstärke, welche nötig ist, um die Remanenz zu beseitigen. Die ausgezogene Kurve stellt einen vollen Wechsel der Magnetisierung von einem hohen Werte von $\mathfrak{B}$ oder $\mathfrak{J}$ in der einen zu einem gleich großen Werte

in der entgegengesetzten Richtung und wieder zurück dar. Wie sich aus der Abb. 19 ergibt, zeigt der Magnetismus eine Art von Beharrungsvermögen, insofern er hinter der magnetisierenden Kraft zurückbleibt, wenn diese einen Kreisprozeß beschreibt. Diese Eigenschaft nennt man Hysterese (E w i n g), eine vollständige magnetische Schleife bezeichnet man als Hystereseschleife. Nach



1. weiches Eisen (Schmiedeeisen, Stahlguß, Flußeisen, Dynamoblech). 2. ausgeglühtes Gußeisen. 3. ungeglühtes Gußeisen. 4. ungehärteter Stahl. 5. gehärteter Stahl.

Abb. 20. Magnetisierungskurven für verschiedene Eisensorten.

mehrfachem Durchlaufen einer solchen Schleife werden die magnetischen Größen genau zyklisch, d. h. jeder folgende Wechsel verläuft wie der vorhergehende.

Ein Zurückbleiben der Magnetisierung tritt auch dann auf, wenn man an irgendeinem Punkte der Hystereseschleife eine kleinere Schleife einschaltet; so zeigt Abb. 19 links unten den Verlauf einer Änderung von $\mathfrak{H}$ von einem höheren negativen Wert zu Null und wieder zurück.

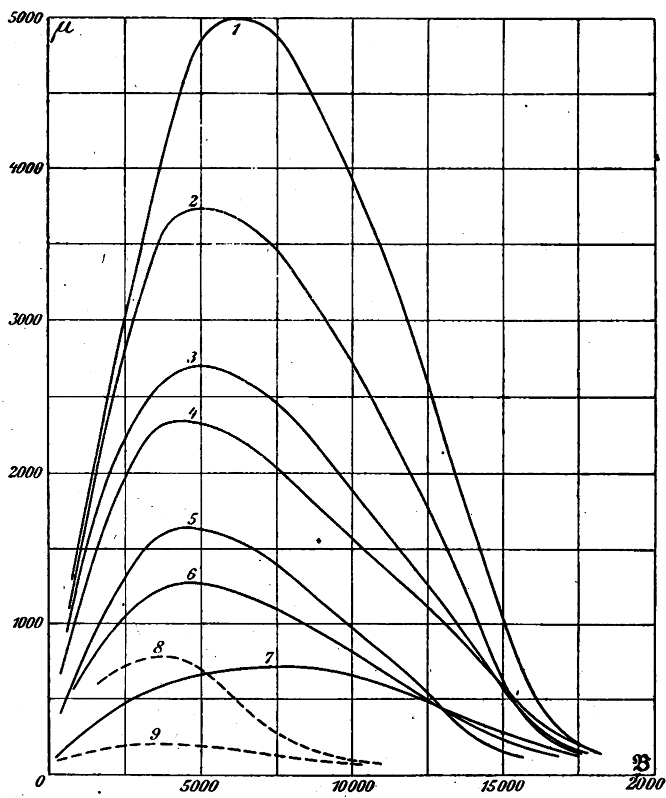


Abb. 21. Permeabilität und Induktion für Stahlguß (1—7) und Gußeisen, geglüht (8), ungeglüht (9).

Ist eine derartige Schleife s e h r klein, so schrumpft sie zu einer Geraden zusammen, deren Neigung gegen die $\mathfrak{H}$-Achse nicht mehr von der Größe der zusätzlichen Feldstärke $d\mathfrak{H}$ abhängt. Entspricht der Feldänderung $d\mathfrak{H}$ die Änderung $d\mathfrak{B}$ der Induktion, so wird die Größe $d\mathfrak{B}/d\mathfrak{H}$ als r e v e r s i b e l e P e r m e a b i l i t ä t bezeichnet (G a n s).

Abb. 20 (S. 31) gibt die Magnetisierungskurven von fünf Eisen- und Stahlsorten. — Abb. 21 stellt die Beziehung zwischen der Permeabilität μ und der Induktion $\mathfrak{B}$ für Stahlguß und Gußeisen dar. Man erhält die Werte von μ, wenn man die der Nullkurve (strichpunktierte Linie in Abb. 19) entnommenen Werte der Induktion $\mathfrak{B}$ durch die zugehörigen Werte der Feldstärke $\mathfrak{H}$ dividiert.

Auch bei weichem Eisen ist μ für sehr geringe magnetisierende Kräfte ($\mathfrak{H} = 0{,}01$) klein, gewöhnlich etwa 100 bis 200, ausnahmsweise bis gegen 500, wächst dann rasch auf einen hohen Wert (1000 bis 10 000) und sinkt bei sehr hohen magnetisierenden Kräften wieder auf ganz kleine Werte.

Bei Gußeisen, weichem und hartem Stahl überschreitet μ selten die Grenze 200 bis 250; doch kann dieser Wert bei Gußeisen durch geeignetes Ausglühen auf das Drei- bis Vierfache gesteigert werden (vgl. Tab. auf S. 35, Nr. 24 bis 27).

Eine Beziehung zwischen der Maximalpermeabilität $\mu_{\max}$, der Remanenz R und der Koerzitivkraft C gibt für weiches, bis zur Sättigung magnetisiertes Eisen die empirische Formel $\mu_{\max} = R/2\,C$ (Gumlich und Schmidt).

Für Werte von $\mathfrak{H}$, welche >7 sind, gilt die angenäherte Gleichung

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H}\left(1 + \frac{10^3}{a + b\,\mathfrak{H}}\right),$$

worin a und b Konstanten bezeichnen.

(32) Magnetische Eigenschaften verschiedener Eisen- und Stahlsorten. In der folgenden Tabelle sind die Werte für die Magnetisierbarkeit verschiedener gehärtete Stahlsorten zusammengestellt (Frau Curie und Reichsanstalt). Hierbei bedeutet t die Härtungstemperatur, C die Koerzitivkraft, R die Remanenz, $\mathfrak{B}$ die Induktion für $\mathfrak{H} = 500$, W die Energievergeudung für 1 cm³ (33); die Indizes s bzw. r lassen erkennen, ob die betreffenden Werte mit Stäben von 20 cm Länge und 1 cm² Querschnitt, die bis zur Sättigung magnetisiert waren, oder mit geschlossenen Ringen gewonnen wurden.

Maßgebend für die Güte eines permanenten Magnets ist die Stärke der Magnetisierung, welche er festzuhalten vermag. Diese hängt aber, wie die Tabelle zeigt, einmal ab von der Höhe der Remanenz $R_r = 4\pi \cdot \mathfrak{J}_r$, die er bei der Untersuchung im geschlossenen Kreise (Ring, Joch) besitzt, sodann aber auch von der Größe der Koerzitivkraft. Je kürzer, gedrungener ein Magnetstab, je weniger geschlossen ein Hufeisenmagnet ist, desto vorteilhafter ist eine hohe Koerzitivkraft selbst auf Kosten der Remanenz. Zur Beurteilung des Materials in bezug auf seine Taug-

Material		Kohlenstoff in %	t^0	$C_{r,s}$	R_s	R_r	$\mathfrak{B}_r$	W_r	$R_r \cdot C_r \times 10^3$
Messungen von Frau Curie:									
Kohlenstoffstahl von Firminy		0,06	1000	3,4	400	7850	20110	28000	27
		0,49	770	23	2800	10490	19660	108000	241
		1,21	770	60	5800	8110	15580	182000	487
Kohlenstoffstahl von Böhler (Steiermark) weich		0,70	800	49	5300				
Kohlenstoffstahl von Böhler (Steiermark) extra zäh, hart		0,99	800	55	5200				
Kohlenstoffstahl von Böhler (Steiermark) extra halbhart		1,17	800	63	5800				
Kupferstahl von Chatillon & Commentry; 3,9 % Cu		0,87	730	66	6200				
Chromstahl von Assailly; 3,4 % Cr		1,07	850	57	6700				
Wolframstahl von Assailly; 2,7 % W		0,76	850	66	6400	10050	16080	260000	663
Wolframstahl von Böhler (Steiermark) Spezialstahl, sehr hart; 2,9 % W		1,10	850	74	6700				
Wolframstahl von Böhler (Steiermark) Boréasstahl, gehärtet; 7,7 % W		1,96	800	85	4700				
Stahl von Allevard 5,5 % W		0,59	770	72	7000	10680	16080	280000	769
Molybdänstahl von Chatillon & Commentry 3,5 % Mo		0,51	850	60	6700				
Molybdänstahl von Chatillon & Commentry 4,0 % Mo		1,24	800	85	6700				
Messungen der Reichsanstalt:	Cr in %								
Chromstahl A	2,9	0,9	850	57,4		10900			626
Chromstahl B	2,9	1,1	850	59,2		10380			615
Chromstahl C	5,8	1,1	850	64,6		9920			641
Chromstahl D	2,9	1,1	900	63,1		9560			603
Chromstahl E	5,8	1,1	900	72,5		9200			666
Wolframstahl 1876				58,1		10200			593
Wolframstahl 1877				61,5		9700			596
Wolframstahl 1615				63,0		10250			646
Wolframstahl 1614				62,3		10880			679
Wolframstahl 1739				66,4		10880			723

lichkeit zu permanenten Magneten kann das Produkt $R_r C_r$ dienen, das, wie die Tabelle zeigt, bei gutem Material 600×10^3 übersteigt. Wenn man den Verlauf der Hysteresekurve kennt, so kann man aus der hierdurch gefundenen Remanenz R_r diejenige eines kürzeren Magnetstabes auf folgende Weise berechnen:

Befindet sich ein Magnetstab von der Stärke $\mathfrak{J}$ in einem Felde $\mathfrak{H}'$, so herrscht, da der freie Magnetismus des Stabes eine entmagnetisierende Wirkung ausübt, d. h. das ungestörte magnetische Feld schwächt, im Innern des Stabes nur die Feldstärke $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N \cdot \mathfrak{J}$. Hierin bezeichnet N den sogenannten Entmagnetisierungsfaktor, der bei sehr gestreckten zylindrischen Stäben nur vom Dimensionsverhältnis v, d. h. dem Quotienten aus Länge und Durchmesser des auf kreisförmigen Querschnitt umgerechneten Stabes, abhängt, und zwar gilt hierfür, wie auch für Rotationsellipsoide, angenähert die Gleichung $N = \frac{4\pi}{v^2}(\log \mathrm{nat}\, 2v - 1)$. Ist nun, wie bei der Remanenz, $\mathfrak{H}' = 0$, so wird $\mathfrak{H} = -N\mathfrak{J} \approx -\frac{N \cdot R_r}{4\pi}$. Diese Größe trägt man in dem Punkt, wo der absteigende Ast der Hysteresekurve die Ordinatenachse schneidet, nach der Richtung der negativen Feldstärke $(-\mathfrak{H})$ auf und verbindet den Endpunkt mit dem Nullpunkt. Der Schnittpunkt dieser Scherungslinie mit dem absteigenden Ast gibt den Betrag an, den man für die Remanenz des betreffenden Stabes zu erwarten hat.

In der folgenden Tabelle sind empirisch gewonnene Werte von N für verschiedene Werte von v zusammengestellt (Riborgh Man).

Werte des Entmagnetisierungsfaktors von zylindrischen Stäben (N_1) und von Rotationsellipsoiden (N_2) vom Dimensionsverhältnis v.

v	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300
N_1	0,68	0,255	0,140	0,0898	0,0628	0,0460	0,0274	0,0183	0,0131	0,0099	0,0078	0,0063	0,0052	0,0025	0,0015	0,0008
N_2	0,70	0,255	0,135	0,0848	0,0587	0,0432	0,0266	0,0181	0,0132	0,0101	0,0080	0,0065	0,0054	0,0026	0,0016	0,0008

In nahezu geschlossenen magnetischen Kreisen (Hufeisenmagneten usw.) ist die entmagnetisierende Kraft viel geringer.

Zur angenäherten, wenn auch nicht einwandfreien, Vorausberechnung der scheinbaren Remanenz der Hufeisenmagnete kann man ein ähnliches Scherungsverfahren wie beim Stabmagnet benützen (Edgcumbe, Electrician Bd. 75, S. 546; 1915).

Die Tabelle auf S. 35 enthält eine Übersicht über die Magnetisierbarkeit verschiedener Eisensorten und über die dabei auftretenden wichtigsten Konstanten. Im allgemeinen gilt die Regel, daß mit wachsender Koerzitivkraft auch die Remanenz und die Energievergeudung [Hystereseverlust (33)] zunimmt, die Maximalpermeabilität abnimmt, doch kommen vielfache Ausnahmen vor.

Mit wachsendem Kohlenstoffgehalt wird das Eisen magnetisch härter, ebenso wirken Verunreinigungen durch Phosphor, Schwefel usw. ungünstig, während Zusatz von Aluminium oder Silizium die Permeabilität bei mäßigen Feldstärken erhöht. Durch Siliziumzusatz wird auch die elektrische Leitfähigkeit des Materials und damit das Auftreten von schädlichen Wirbelströmen in Transformatoren usw. beträchtlich vermindert („legiertes" Dynamoblech).

Unmagnetische Legierungen. Während die Magnetisierbarkeit des Eisens durch den Zusatz von wenig Nickel (bis 5 %) noch zunimmt, vermindert sie sich durch höheren Nickelzusatz sehr stark. Nickelstahl von ca. 26 % Nickelgehalt ist bei gewöhnlicher Temperatur nahezu unmagnetisierbar (austenitisches Gefüge), er wird dagegen wieder magnetisierbar durch Abkühlung auf Temperaturen unter 0° und behält dann die Magnetisierbarkeit auch in höheren Temperaturen bei (martensitisches Gefüge). Durch eine Erhitzung auf ca. 600°

Magnetisierbarkeit verschiedener Eisensorten
(nach Beobachtungen in der Reichsanstalt).

Material	Lfde. Nr.	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}_{max}$	B für $\mathfrak{H}=100$	Remanenz	Koerz. Kraft	μ_{max}	Energievergeudung (Erg.)	$\eta =$	Widerstand für m/mm² (Ohm)
Elektrolyteisen 1×gegl.	1	150	18870	18050	10850	0,38	14600	—	—	0,099
,, 12×gegl.	2	150	18520	17700	850	0,15	4900	—	—	—
Walzeisen	3	129	18190	17700	10300	0,60	8350	4900	0,00075	0,113
Schmiedeeisen . . .	4	145	18370	17650	9000	1,65	2850	12300	185	0,148
gegossenes Material (Stahlguß, Flußeisen, Dynamostahl)	5	129	17950	17470	8000	0,80	5240	10100	158	0,143
	6	129	17700	17200	7500	0,95	4070	9400	150	0,154
	7	128	18040	17570	7200	1,04	3200	10700	166	0,142
	8	128	18080	17600	7500	1,35	2610	11400	176	0,167
	9	145	18250	17500	10200	1,50	3380	13600	207	0,148
	10	127	18190	17700	9200	1,82	2460	14700	225	0,154
	11	129	18190	17670	7500	2,00	1900	15700	240	0,129
	12	129	17940	17400	11700	2,42	2250	20300	317	0,158
	13	128	17790	17300	11080	3,27	1620	24200	383	0,217
	14	129	17270	16750	9550	4,33	1100	30200	502	0,196
Dynamoblech (geglüht)	15	129	17430	16900	9800	1,15	4950	9400	154	—
	16	128	19540	19100	7550	1,37	2940	10700	146	—
	17	146	18490	17700	8300	1,62	2660	11200	167	0,144
	18	146	18500	17730	8800	2,39	1840	16200	241	0,144
	19	129	17440	17000	10000	2,90	1740	17600	288	—
	20	127	18320	17800	10150	3,38	1410	22000	332	—
	21	124	18880	18450	11550	4,18	1220	28800	415	—
Dynamoblech legiert, schwach	22	150	18220	17430	9400	1,30	3300	12600	192	—
Dynamoblech legiert, stark	23	150	17550	16740	9850	0,77	6200	8090	131	—
Gußeisen, ungeglüht	24	155	10320	9030	4630	11,3	200	34600	1310	0,878
Gußeisen, dass. geglüht	25	155	10930	9900	5560	4,06	800	14900	515	0,798
Gußeisen, ungeglüht	26	154	10030	8800	4630	13,2	200	36600	1450	0,989
Gußeisen, dass. geglüht	27	155	10640	9600	5060	4,68	560	16100	580	—
Stahl, gehärtet	28	234	16220	13900	11700	52,6	195	—	—	0,325
	29	235	15120	12200	10500	61,7	125	—	—	0,360
	30	238	13370	9500	8880	69,7	—	—	—	0,422

Sättigungswerte $4\pi\mathfrak{J}$ für:

reinstes Elektrolyteisen 21600
Schmiedeeisen, guten Stahlguß usw. . . . . 21200—21400
Stahl (ungehärtet) 21600—1580 p* (bis 1% C); etwa 19800
,, (gehärtet) 21600—3200 p* (bis 1,2% C); etwa 17800
Gußeisen etwa 16500
Siliziumlegierungen 21600—480 p* (bis 5% Si).
Dynamoblech (schwach legiert) etwa 20500
,, (stark ,,) ,, ... 19300

*p = % Gehalt von C bzw. Si.

Für Feldstärken über 2000 findet man hieraus die zugehörigen Induktionen nach der Formel $\mathfrak{B} = 4\pi\mathfrak{J} + \mathfrak{H}$.

wird er wieder unmagnetisch und bleibt in diesem Zustande bei der Abkühlung auf gewöhnliche Temperatur. Es existieren also für derartige (irreversibele) Nickellegierungen zwei verschiedene magnetische Zustände innerhalb eines bestimmten Temperaturintervalls, das von der Zusammensetzung der Legierung abhängt. Zusätze von Kohlenstoff, Chrom, Mangan erniedrigen den Umwandlungspunkt sehr beträchtlich, so daß es gelungen ist, Legierungen herzustellen, welche auch bei der Temperatur der flüssigen Luft nicht magnetisierbar werden.

Beim Zusatz von noch mehr Nickel verliert sich diese Eigentümlichkeit, die Legierung wird wieder bei allen Temperaturen magnetisierbar, der magnetische Zustand ist reversibel (Hopkinson, Dumont, Dumas, Guillaume).

Auch durch den Zusatz von etwa 12 % Mangan wird Stahl praktisch unmagnetisierbar (Hadfield, Gumlich).

(33) Hystereseverlust (Energievergeudung). Zur Magnetisierung von 1 cm³ Eisen von $\mathfrak{B}_1$ bis zu $\mathfrak{B}_2$ muß die Energie $\frac{1}{4\pi}\int_{\mathfrak{B}_1}^{\mathfrak{B}_2} \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{B}$ aufgewendet werden. Führt man einen vollständigen Kreisprozeß von $+\mathfrak{B}$ zu $-\mathfrak{B}$ und wieder zurück aus, so gewinnt man beim Rückgange nur einen Teil der Energie wieder, der Rest wird in Wärme verwandelt. Das Flächenstück, das von der Kurve umschlossen wird, welche $\mathfrak{B}$ oder $\mathfrak{J}$ als Funktion von $\mathfrak{H}$ darstellt (vgl. Abb. 19), ist derjenigen Arbeitsmenge proportional, welche bei dem magnetischen Kreisprozeß in Wärme verwandelt worden ist (Verlust durch Hysterese; Warburg). Auch für unsymmetrische Kreisprozesse (Abb. 19 links unten) gilt dieser Satz.

Mißt man $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{J}$ im CGS-System, so ist die in Wärme verwandelte Arbeitsmenge für 1 cm³ Eisen für einen vollen Kreisprozeß $= \int \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{J}$ oder $\frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{B}$, gleichfalls in CGS.

Nach Steinmetz (ETZ 1892) kann man die durch Hysterese in 1 cm³ Eisen verbrauchte Arbeitsmenge bei verschieden hohen Induktionen $\mathfrak{B}$ darstellen durch $\eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6}$, worin die Werte von η zwischen 0,001 und 0,025 liegen (vgl. auch Tab. S. 35, 36 und 37).

Jedoch ist, wie sich aus den eigenen Versuchen von Steinmetz, namentlich aber aus den Versuchen der Reichsanstalt ergibt, der Wert η wenigstens für magnetisch weiches Material keineswegs konstant, sondern wächst für Induktionen, welche oberhalb des Knies der Magnetisierungskurve liegen, sehr beträchtlich, wie die folgende Tabelle zeigt.

Beziehung zwischen η und $\mathfrak{B}$ für einige Materialien.

Weiches Schmiedeeisen		Geglühtes schwedisches Schmiedeeisen		Dynamoblech		Geglühter Wolframstahl	
$\mathfrak{B}_{max}$	η	$\mathfrak{B}_{max}$	η	$\mathfrak{B}_{max}$	η	$\mathfrak{B}_{max}$	η
5000	0,00097	4800	0,00168	4000	0,00137	4200	0,0138
8400	94	8000	169	6000	137	8300	137
14800	105	11000	187	8000	141	10800	136
17300	114	13800	216	10000	148	16800	139
18800	124	18300	252	12000	157	18500	134
		20500	214	14000	169		
				16000	185		

Trotzdem ist die Steinmetzsche Formel unter Umständen gut zu gebrauchen, wenn es sich darum handelt, die Hystereseverluste verschiedener nicht genau gleich hoch magnetisierter Materialien zu vergleichen.

Die von Rud. Richter (ETZ 1910, S. 1241) für den Hystereseverlust vorgeschlagene Formel $V = a \cdot \mathfrak{B} + b \cdot \mathfrak{B}^2$ paßt sich dem Verlauf der Verlustkurve viel besser an als die Formel von Steinmetz, verlangt aber natürlich zur Ermittelung der Konstanten a und b die Bestimmung des Hystereseverlusts bei zwei verschieden hohen Induktionen (etwa $\mathfrak{B} = 10\,000$ und $15\,000$).

Der Hystereseverlust wird durch andauernde Erwärmung (sog. Altern des Dynamoblechs, vgl. (25)) und durch hohen Druck vergrößert, wahrscheinlich aber nicht durch die fortwährende Ummagnetisierung; hochlegierte (32) Bleche altern wenig oder gar nicht.

Bei einer Frequenz von f Perioden in 1 Sekunde wird in 1 kg Eisen oder Stahl vom spezifischen Gewicht 7,7 eine Leistung verbraucht von (vgl. nachstehende Tabelle.)

$$f \cdot \frac{\eta \mathfrak{B}^{1,6}}{7{,}7 \cdot 10^4} \text{ Watt.}$$

Hystereseverlust in 1 kg Eisen oder Stahl (spez. Gew. = 7,7) bei 100 Perioden in 1 Sekunde in Watt.

$\mathfrak{B}$	$\eta =$ 0,0010	$\eta =$ 0,0015	$\eta =$ 0,0020	$\eta =$ 0,0025	$\mathfrak{B}$	$\eta =$ 0,0010	$\eta =$ 0,0015	$\eta =$ 0,0020	$\eta =$ 0,0025
5 000	1,076	1,614	2,15	2,69	11 000	3,803	5,705	7,61	9,51
6 000	1,442	2,164	2,88	3,60	12 000	4,373	6,556	8,74	10,93
7 000	1,845	2,768	3,69	4,61	13 000	4,969	7,452	9,94	12,42
8 000	2,284	3,428	4,57	5,71	14 000	5,594	8,387	11,19	13,98
9 000	2,759	4,140	5,51	6,90	15 000	6,248	9,367	12,49	15,62
10 000	3,265	4,898	6,53	8,16					

(34) Der magnetische Kreis. Die magnetischen Kraftlinien werden erzeugt von der magnetomotorischen Kraft, d. i. derjenigen Kraft, welche das vorher unmagnetische Eisen (oder Stahl) magnetisch gemacht hat. Die Kraftlinien sind geschlossene Kurven; beim Übergang aus Eisen in Luft oder andere unmagnetische Körper werden sie gebrochen nach dem Gesetz (vgl. Abb. 22):

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu \operatorname{tg} \beta.$$

Außerhalb des Eisens bilden die Kraftlinien das magnetische Feld (29); ihre Richtung gibt die Richtung der Kraft, ihre Dichte die magnetische Feldstärke an.

Der magnetische Widerstand $\mathfrak{R}$ des Weges, der sich den Kraftlinien darbietet, ist bestimmend für die Gesamtmenge Φ der Kraftlinien, welche von der magnetomotorischen Kraft $\mathfrak{F}$ erzeugt werden; es gilt, analog dem Ohmschen Gesetz

$$\Phi = \mathfrak{B} \cdot q = \mathfrak{F}/\mathfrak{R}.$$

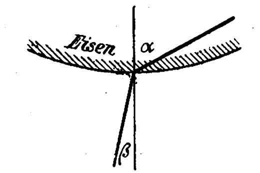


Abb. 22. Brechung der magnetischen Kraftlinien.

Für einen vollständig bewickelten Eisenring aus gleichmäßigem Material und von gleichbleibendem Querschnitt ist $\mathfrak{F} = \mathfrak{H} \cdot l$, worin l die mittlere Länge des Kraftlinienweges und $\mathfrak{H} = 0{,}4\pi \cdot K I$ (29).

$\mathfrak{F}$ läßt sich auch als magnetische Potentialdifferenz oder Spannung deuten. Wenn längs einer magnetischen Kraftlinie die Werte von $\mathfrak{H}$ gegeben sind, so gilt für die ganze Kraftlinie wie auch für jedes Stück die Gleichung $\mathfrak{F} = \int \mathfrak{H} \cdot dl$. Hat $\mathfrak{H}$ längs einer Kraftlinie auf einer Weglänge l einen konstanten Wert, so herrscht zwischen den Endpunkten der Länge l die magnetische Spannung $\mathfrak{F} = \mathfrak{H} \cdot l$. Da $\mathfrak{H} \cdot \mu = \mathfrak{B}$ ist, so folgt $\mathfrak{F} = \mathfrak{B} l/\mu$. Setzt sich der Kraftlinienweg aus mehreren Stücken zusammen, so wird $\mathfrak{F} = \Sigma \mathfrak{H} \cdot l = \Sigma \mathfrak{B} l/\mu = 0{,}4 \cdot \pi \cdot m \cdot I$ (m = gesamte Windungszahl). Diese Formel enthält das Wichtigste für die Berechnung elektromagnetischer Apparate. (90.)

Bei einem geschlitzten Ring, bei welchem der Eisenteil die Länge l_i und der Luftschlitz die Breite l_a hat $(l_i + l_a = 2r\pi)$, ergibt sich angenähert der Kraftlinienfluß

$$\Phi = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot m \cdot I}{\frac{l_i}{\mu q} + \frac{l_a}{q}}.$$

Bei einem permanenten Ringmagnet kann man sich die im Zähler stehende magnetomotorische Kraft durch eine eingeprägte Feldstärke $\mathfrak{H}_e \cdot l_i$ ersetzt denken (G a n s), so daß auch hier gilt

$$\Phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}_i + \mathfrak{R}_a}.$$

Der magnetische Widerstand $\mathfrak{R}$ hängt von den Abmessungen und der materiellen Beschaffenheit des Weges für die Kraftlinien ab. Für einen Körper, der gleichmäßig von parallelen Kraftlinien durchzogen wird, ist $\mathfrak{R}$ proportional der Länge des Körpers und umgekehrt proportional dem Querschnitt q sowie der Permeabilität μ, also $\mathfrak{R} = l/q\mu$.

μ ist für Luft $= 1$, für weiches Eisen in schwachen Feldern etwa 200—10 000; bei stark zunehmender Magnetisierung nimmt der Wert von μ für Eisen wieder ab, s. Abb. 21.

Wenn die Kraftlinien auf ihrem Wege mehrere verschieden bemessene oder beschaffene Körper mit den magnetischen Widerständen $\mathfrak{r}_1$, $\mathfrak{r}_2$, $\mathfrak{r}_3$ durchsetzen, so ist der gesamte magnetische Widerstand des Weges gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{r}_1 + \mathfrak{r}_2 + \mathfrak{r}_3 + \cdots = \Sigma\mathfrak{r}.$$

Wenn den Kraftlinien mehrere Wege nebeneinander geboten werden, so berechnet sich der gesamte Widerstand $\mathfrak{R}$ der nebeneinander liegenden Wege aus der Formel

$$\frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{1}{\mathfrak{r}_1} + \frac{1}{\mathfrak{r}_2} + \frac{1}{\mathfrak{r}_3} + \cdots = \Sigma\frac{1}{\mathfrak{r}}.$$

E i n f l u ß d e s w e i c h e n E i s e n s a u f d i e K r a f t l i n i e n. Der Verlauf der Kraftlinien in einem magnetischen Feld wird durch die Gegenwart von magnetisierbaren Körpern, besonders von weichem Eisen, beeinflußt. Die Kraftlinien werden aus ihrer Richtung abgelenkt und in großer Zahl und Dichte durch das Eisen geführt (magnetische Schirmwirkung des Eisens (120); Panzergalvanometer (135).

(35) Erdmagnetismus. Die Erde ist ein sehr großer Magnet, dessen Südpol nahe beim geographischen Nordpol, dessen Nordpol nahe beim geographischen Südpol liegt.

Der Nordpol einer durchaus frei beweglichen Magnetnadel zeigt nahezu nach dem geographischen Norden, und die magnetische Achse der Nadel macht mit der Horizontalen einen bestimmten Winkel. Die Abweichung von der geographischen Nord-Süd-Richtung heißt Deklination, sie ist in Deutschland westlich und beträgt etwa 8°. Der Winkel der magnetischen Achse mit dem Horizont heißt Inklination; der Nordpol zeigt nach unten, der Inklinationswinkel beträgt bei uns etwa 66°.

Die nur in der horizontalen Ebene frei beweglichen Magnetnadeln, wie Bussolen, Magnetometer usw. suchen sich stets in die magnetische Nord-Südrichtung, den „magnetischen Meridian" einzustellen; sie stehen nur unter der Einwirkung der horizontalen Komponente (Horizontalstärke $\mathfrak{h}$) des Erdmagnetismus.

In Gebieten von geringer Ausdehnung, in Beobachtungsräumen, Laboratorien u. dgl. darf man die Kraftlinien des erdmagnetischen Feldes als parallel und geradlinig, die Stärke des magnetischen Feldes als konstant ansehen, sofern nicht vorhandene Eisenmassen, Magnete, Stromschleifen usw. Störungen hervorbringen,

die jedoch die Feldstärke nicht in dem Maße beeinflussen wie die Richtung der Kraftlinien.

In größeren Gebieten ändert sich die Horizontalstärke mit der geographischen Lage des Ortes; sie liegt in Deutschland zwischen 0,18 (Kiel) und 0,21 (Lindau).

(36) Schwingungsdauer einer Magnetnadel im erdmagnetischen Feld. Die Richtkraft ist gleich dem Produkt aus dem magnetischen Moment der Nadel $\mathfrak{M}$ und der horizontalen Intensität $\mathfrak{h}$, also $= \mathfrak{M}\mathfrak{h}$; Trägheitsmoment J nach (13) berechnet.

$$\text{Schwingungsdauer } t = \pi \cdot \sqrt{\frac{J}{\mathfrak{M}\,\mathfrak{h}}}.$$

Das elektrische Feld.

(37) Einheit der Elektrizitätsmenge. Gleichartig geladene Körper stoßen einander ab, ungleichartig geladene ziehen einander an. Die elektrostatische Einheit der Ladung oder Elektrizitätsmenge ist diejenige, die im Abstand 1 cm auf eine ihr gleiche durch den leeren Raum hindurch mit der Kraft 1 dyn $\approx$ 1,02 mg* wirkt. Vorausgesetzt ist hierbei, daß die körperlichen Träger der Elektrizitätsmengen klein gegenüber ihrem Abstande, und daß alle anderen Körper weit entfernt sind. Dann gilt nämlich das Coulombsche Gesetz, daß die Kraft zwischen zwei Ladungen Q_1, Q_2 im Abstand r gleich $Q_1\, Q_2/r^2$ ist.

Die elektromagnetische Einheit der Ladung enthält $3 \cdot 10^{10}$, die praktische Einheit (Coulomb, Amperesekunde) $3 \cdot 10^9$ elektrostatische Einheiten. Ein Coulomb wirkt also auf ein zweites Coulomb in 1 km Abstand mit einer Kraft von rund 1 t.

(38) Elektrisches Feld[1]) heißt jeder Raum, in dem sich elektrische Wirkungen äußern. Zu jedem Punkt des Feldes läßt sich ein Vektor (S. 8), die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ angeben; sie ist gleich der Kraft in Dyn, die ein sehr kleiner, mit einer Einheit positiver Elektrizität geladener Körper (Einheitspol) dort erfährt. (Voraussetzung: grad $\varepsilon = 0$; s. (49).)

Durch jeden Punkt des Feldes läßt sich eine Feld- oder Kraftlinie ziehen, deren Tangente in jenem Punkte die Richtung der Feldstärke angibt.

(39) Im **elektrostatischen Felde,** d. h. in einem elektrischen Felde, das ohne Energieumsatz fortbesteht, ist die Arbeit, die die elektrischen Kräfte beim Herumführen des Einheitspols auf einem geschlossenen Wege leisten, gleich Null:

$$\oint \mathfrak{E}\, d\mathfrak{s} = 0.$$

Daraus folgt: 1. daß zu beiden Seiten der Grenzfläche zweier Körper die tangentielle Komponente von $\mathfrak{E}$ denselben Wert hat; 2. daß sich $\mathfrak{E}$ von einem einwertigen Potential φ ableitet:

$$\mathfrak{E} = -\,\mathrm{grad}\,\varphi;\ \mathrm{rot}\ \mathfrak{E} = 0.$$

Die Flächen konstanten Potentials werden von den Kraftlinien senkrecht durchkreuzt. Solche Flächen sind auch die Leiteroberflächen. Das Potential der Oberfläche herrscht auch im Leiterinnern, weil dort überall $\mathfrak{E} = 0$ ist.

(40) Die Spannung zwischen zwei Leitern ist das von einem beliebigen Punkte des einen nach einem beliebigen Punkte des zweiten auf einem beliebigen Wege genommene Integral $\int \mathfrak{E}\, d\mathfrak{s}$. Es bedeutet die bei der Überführung des Einheitspols auf diesem Wege geleistete Arbeit und ist gleich der Potentialdifferenz der Leiter.

[1]) Im folgenden wird von dem Rechnen mit Vektoren Gebrauch gemacht. Die Erklärung der Bezeichnungen findet sich in den Abschnitten (7) und (8); dort sind auch die Rechenregeln zusammengestellt.

(41) Die dielektrische Verschiebung oder Erregung ist in isotropen (nicht kristallartigen) Körpern der Feldstärke proportional:

$$\mathfrak{D} = \varepsilon \mathfrak{E} / 4 \pi c^2.$$

ε ist die Dielektrizitätskonstante, $c = 3 \cdot 10^{10}$. Von jeder Ladungseinheit geht stets der Verschiebungsfluß 1 aus. Es ist daher die Raumdichte der Ladung $\eta = \operatorname{div} \mathfrak{D}$; die Flächendichte an der Grenze der Körper (1) und (2) beträgt $\omega = \mathfrak{D}_{n_1} + \mathfrak{D}_{n_2} = \operatorname{Div} \mathfrak{D}$, wobei die positive Richtung der Normalkomponente $\mathfrak{D}_n$ aus dem betreffenden Körper hinausweist.

(42) Dielektrizitätskonstanten.

Balata, roh	3,4	Kautschuk (natürlich oder synthetisch)	2,7 bis 2,8
Balata, stark entharzt	3,1	Marmor	8,3
Bernstein	2,9	Mikanit	4,5 bis 5,5
Cellon, hell	3,5	Olivenöl	3
Ceresin	2,1 bis 2,2	Papier	1,8 bis 2,6
Ebonit (Hartgummi)	2,5 bis 3,5	Paraffin (fest)	2,1 bis 2,2
Glas, verschieden[1])	5 bis 8	Paraffinöl	2 bis 2,5
weißes Glas	7,1	Pertinax	4,8
gewöhnl. Flintglas O 118	7,3	Petroleum	2,0 bis 2,2
Baryt Leichtflint O 1266	7,7	Porzellan	4,4
Silikatflint S 461	16,5	Quarz (amorph)	3,7
Kron mit hoher Dispersion O 381	6,8	Quarz (parallel zur Hauptachse)	4,5
Barytkron O 1209	8,3	Rapsöl	2,3
Fluorkron O 7185	5,9	Rizinusöl	4,7
Uviolglas	5,6	Rüböl	3
Glimmer	5 bis 8	Schellack	2,7 bis 3,7
Guttapercha (45 % Harzgehalt)	3 bis 3,2	Schwefel	3,6 bis 4,3
Gutta-Gentzsch	2,5	Siegellack	4,3
Starkstromkabel-Isolation (getränkt. Papier od. Jute)	4,3	Terpentinöl	2,2
Fernsprechkabel-Isolation (Papier und Luft)	1,6	Transformatorenöl, Mineralöl	2,2
		Transformatorenöl, Harzöl	2,5
		Wasser	80

(43) Dielektrischer Energieverlust. Die in (41) angegebene Beziehung zwischen $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{D}$ gilt genau nur für Gase.

a) Feste Dielektrika. Wirkt auf ein festes Dielektrikum ein elektrisches Wechselfeld $\mathfrak{E}_0 \sin 2\pi f t$, so bleibt die Verschiebung um einen Winkel δ in der Phase hinter der Feldstärke zurück (dielektrische Nachwirkung). Dem entspricht eine Leistung in der Raumeinheit $N = \varepsilon \mathfrak{E}_0^2 f \operatorname{tg} \delta / 4 c^2$ Erg/s · cm³ oder, wenn statt des Scheitelwertes $\mathfrak{E}_0$ der Effektivwert $\mathfrak{E}$ eingeführt und dieser in V/cm ausgedrückt wird,

$$N = 0{,}555\, \varepsilon\, \mathfrak{E}_{\mathrm{eff}}^2 \cdot f \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12} \text{ Watt/cm}^3.$$

Für einen Kondensator der Kapazität C Farad, an dem eine effektive Wechselspannung E Volt liegt, ergibt sich hieraus die Verlustleistung $N = 2\pi f E^2 C \operatorname{tg} \delta$ Watt.

δ heißt der dielektrische Verlustwinkel. Wenn er, wie in den meisten Fällen, klein ist, so ist $\operatorname{tg} \delta \approx \sin \delta = \cos \varphi =$ dem Leistungsfaktor.

Die Größe des Verlustwinkels δ hängt von der Temperatur stark ab, dagegen nur in sehr geringem Maße von der Frequenz (größere Änderungen von δ treten

[1]) R. Jaeger, Dissert., Berlin, 1917 (s. a. ETZ 1919, S. 442—443).



meist erst bei Frequenzänderungen im Verhältnis 1 : 10 und mehr hervor). Die folgende Tafel gibt einige Werte. Es entspricht $\mathrm{tg}\,\delta = 2{,}9 \cdot 10^{-4}$ einem Winkel von 1', $\mathrm{tg}\,\delta = 175 \cdot 10^{-4}$ einem Winkel von 1°.

Dielektrischer Verlustwinkel.

Stoff	Frequenz f	Temperatur °C	10000 × tg δ	Stoff	Frequenz f	Temperatur °C	10000 × tg δ
Balata, roh . . .	1000	15	48	Weichgummi (33%			
Balata, stark ent-				Paragummi) . .	1000	20	150
harzt	1000	15	26	Isolation (Draht-)			
Cellon, hell . . .	1000	20	330	aus Emaillelack	1000	20	180
Ceresin	1000	20	0,3	,, Seide . . .	1000	20	400
Ebonit (Hart-				,, Baumwolle	1000	20	3600
gummi),				Papier - Luftraum-			
gute Sorte . .	1000	20	25 bis 35	isolation f. Fern-			
geringe Sorte .	1000	20	230	sprechkabel . .	1000	20	27
					10^4	20	40
					10^5	20	72
Flintglas (Schott				Papierisolation, ge-			
u. Gen., Jena) .	50	20	40	tränkt, f. Stark-			
	1000	20	30	stromkabel . .	50	20	400
	5000	20	15	Papier (trocken) .	1000	20	40
	50000	20	8	Papier, getrocknet			
	140000	20	4	und mit Paraffin			
Glas (Spiegel-) . .	1000	17	180	getränkt . . .	50	20	30 bis 150
Glimmer	50	20	3 bis 15		1000	20	30 bis 100
	1000	20	2 bis 10	Paraffin	1000	20	0,8
Guttapercha . . .	1000	15	240	Pertinax	1000	20	250
Gutta-Gentzsch .	1000	15	65	Porzellan	50	20	500
Kautschuk (Para,				Paraffinöl[1]) . . .	50	15	2,9
roh oder vulka-				Rizinusöl[1]) . . .	50	16,5	25
nisiert)	1000	20	100	Transformatoren-			
,, (synthet.) .	1000	20	200	öl[1])	50	17,5	50

Die dielektrische Nachwirkung unterscheidet sich von der magnetischen Hysterese durch das Fehlen der Remanenz[2]) und der Koerzitivkraft; nach dem Erlöschen des äußeren Feldes klingt auch die Verschiebung allmählich ab. Die dielektrische Nachwirkung rührt von Ungleichförmigkeiten im Stoff her, und zwar kommt es hierbei auf das Verhältnis der Dielektrizitätskonstante zur Leitfähigkeit an; je mehr dieses Verhältnis innerhalb eines Körpers schwankt, um so stärker tritt die Nachwirkung hervor. Sehr gleichförmige Stoffe, wie gereinigtes Ceresin und Paraffin, haben sehr geringe dielektrische Verluste.

Literatur: J. C. Maxwell, Lehrb. d. Elektrizität u. d. Magnetismus, Bd 1. Art. 328—330 — E. v. Schweidler, Ann. d. Phys. (4) Bd. 24, 1907, S. 711. — K. W. Wagner, Ann. d. Phys. (4) Bd. 40, 1913, S. 817; Archiv f. Elektrot. Bd. 2, 1914, S. 371; ebenda, Bd. 3, 1914, S. 67 (hier auch Literaturangaben über die wichtigeren experimentellen Arbeiten aus der neueren Zeit). — F. Tank, Ann. d. Phys. (4) Bd. 48, 1914, S. 307. — U. Meyer, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1917, S. 139.

In feuchtigkeitshaltigen Faserstoffen (z. B. Baumwollisolation) treten neben den dielektrischen Verlusten im elektrischen Wechselfelde noch zusätzliche Ver-

[1]) Siehe die Ausführungen unter b).
[2]) Remanente Elektrisierung ist bisher nur bei den pyroelektrischen Kristallen (Turmalin, Topas u. a.) beobachtet worden. Vgl. W. Thomson, Phil. Mag. (5) Bd. 5, S. 24, 1878. — E. Riecke, Wied. Ann. Bd. 28, S. 43, 1886.



luste infolge anomaler Leitung (78) auf. Diese Verluste nehmen schneller als das Quadrat der Spannung zu, und zwar besonders bei niedrigen Frequenzen (Näheres im Archiv f. Elektrot. Bd. 3, 1914, S. 99 bis 105).

b) Flüssige Dielektrika. Während bei den festen Dielektriken der Energieverbrauch durch Stromleitung (Joulesche Wärme) neben dem Energieverlust durch dielektrische Nachwirkung meistens verschwindend gering ist, verhalten sich flüssige Dielektrika gerade umgekehrt. Bei ihnen rührt der Verlust überwiegend von elektrolytischer Leitung her und ist von der Frequenz unabhängig. Verlustwinkel und Leistungsfaktor sind somit der Frequenz umgekehrt proportional. Leitfähigkeit und Energieverlust wachsen mit der Temperatur schnell an. Da nach Untersuchungen von Hertz, Warburg, Jaffé und Tank die Leitfähigkeit flüssiger Dielektrika von Verunreinigungen herrührt, verschwinden die dielektrischen Anomalien aller flüssigen Isolatoren mit zunehmender Reinheit der Substanzen. (G. L. Addenbrooke, Electrician Bd. 68, 1912, S. 869. — L. Pungs, Arch. f. Elektrot. Bd. 1, 1912, S. 329. — F. Tank, Ann. d. Phys. (4) Bd. 48, 1914, S. 307.)

(44) Kapazität zweier Leiter gegeneinander ist das Verhältnis ihrer Ladung zu der zwischen ihnen herrschenden Spannung, wenn alle von dem einen Leiter ausgehenden Verschiebungslinien auf dem andern Leiter münden. Sind mehrere Leiter im Felde vorhanden, so ist die Ladung jedes einzelnen eine lineare Funktion der Spannungen aller Leiter gegen einen auszuwählenden.

(45) Werte von Kapazitäten.

	Kapazität (Mikrofarad)
1. Zwei im Abstand d einander gegenüberstehende parallele Flächen von der Größe S (Leydener Flasche, Kondensatoren)	$\frac{\varepsilon S}{36\pi d}10^{-5}$
2. Eine zwischen zwei parallelen Flächen liegende dritte Fläche mit den Abständen d_1 und d_2 von den äußeren Flächen	$\frac{\varepsilon S}{36\pi}\cdot\left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}\right)10^{-5}$

Ist die Zwischenschicht von der Dicke d zusammengesetzt aus parallelen Schichten aus verschiedenem Material von den Dicken d_1, d_2, d_3 .... und den Dielektrizitätskonstanten ε_1, ε_2, ε_3 ..., so tritt an die Stelle von d/ε

$$\frac{d_1}{\varepsilon_1}+\frac{d_2}{\varepsilon_2}+\frac{d_3}{\varepsilon_3}+\cdots$$

3. Zylinder vom Radius r, der von einem Zylinder vom Radius r_1 umgeben ist (Kabel), für 1 km Länge	$\frac{\varepsilon}{18 \log \text{nat} \frac{r_1}{r}}$
4. Zylinder vom Radius r, der im Abstande h mit seiner Achse parallel einer unendlichen Ebene liegt, wobei r klein gegen h (Draht im Abstand h über dem Erdboden), für 1 km Länge	$\frac{\varepsilon}{18 \log \text{nat} \frac{2h}{r}}$
5. Zwei Zylinder mit den Radien r_1 und r_1, die im (gegen r großen) Abstand a einander parallel liegen, für 1 km Länge	$\frac{\varepsilon}{18 \log \text{nat} \left(\frac{a^2}{r_1 r_2}\right)}$
6. Desgl., $r_1=r_2=r$ (Doppelleitung, Drahtradius r) . . .	$\frac{\varepsilon}{36 \log \text{nat} \frac{a}{r}}$
7. Zwei konzentrische Kugeln mit den Radien r_1 und r_2 .	$\frac{\varepsilon}{9}\frac{r_2 r_1}{r_2-r_1}\cdot 10^{-5}$

Maße der Längen und Flächen in cm und cm².

(46) Verschiedene Schaltungsweisen der Kondensatoren.

Sind die Kapazitäten C_1, C_2 ... C_n parallel geschaltet, so ist die Gesamtkapazität dieser Zusammenstellung

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n.$$

Sind diese Kondensatoren dagegen in Reihe geschaltet, so ist die Kapazität der Reihe aus der Beziehung $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \cdots + 1/C_n$ zu berechnen. Ist $C_1 = C_2 = \cdots = C_n = C_0$, so wird $C = C_0/n$. Für zwei verschiedene hintereinander geschaltete Kondensatoren C_1 und C_2 ergibt sich

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

(47) Kapazität der Leitungen. Liegen im wesentlichen nur zwei Leiter (Hin- und Rückleitung) im elektrischen Felde, so wende man die entsprechende der vorstehenden Formeln (45) an. Liegen mehr Leiter im Felde, so kann man ihreLadungen bei gegebener Spannungsverteilung so berechnen, als ob je zwei von ihnen durch einen Kondensator verbunden wären[1]). Dessen Kapazität, die Teilkapazität der beiden Leiter gegeneinander, muß unter Berücksichtigung der Lage aller Leiter berechnet werden, wofür sich nur in besonderen Fällen einfache Formeln ergeben. Man tut im allgemeinen besser, die Ladungen aus den Spannungen unmittelbar nach einem einfachen Näherungsverfahren zu berechnen, das F. Breisig (ETZ 1898, S. 772; 1899, S. 127) und L. Lichtenstein (ETZ 1904, S. 126) entwickelt haben.

a) **Oberirdische Doppelleitungen,** die sich in einer gegenüber dem Leiterabstand großen Höhe über dem Erdboden befinden; die Kapazität ist nach (45), Formel 6 zu berechnen, wobei $\varepsilon = 1$ ist. Die folgende Tafel erspart die Rechnung.

Kapazität oberirdischer Doppelleitungen in μF/km.

$\frac{a}{r}$	C	$\frac{a}{r}$	C	$\frac{a}{r}$	C	$\frac{a}{r}$	C
20	0,00927	80	0,00634	140	0,00562	250	0,00503
30	0,00817	90	0,00617	150	0,00554	300	0,00487
40	0,00753	100	0,00603	170	0,00541	400	0,00464
50	0,00710	110	0,00591	190	0,00529	500	0,00447
60	0,00679	120	0,00580	210	0,00520	1000	0,00402
70	0,00654	130	0,00571	230	0,00511	2000	0,00366

b) **Vielpaarige Fernsprechkabel** üblicher Bauart mit Doppelleitungen und Papier-Luftisolation für Leiter von

0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	mm Stärke
0,031	0,033	0,035	0,037	0,040	0,041	0,042	μF/km

Für Fernkabel mit ballonartiger Papierumspinnung bei einer Leiterstärke von 2 mm 0,036 bis 0,038 μF/km, von 3 mm 0,044 bis 0,047 μF/km.

c) **Telegraphenkabel** mit Guttaperchaisolierung; die Kapazität beträgt etwa 0,2 μF/km.

d) Die **Teilkapazitäten von symmetrischen Dreileiterkabeln** (zur Übertragung hochgespannten Drehstromes) mit runden Leitern in marktgängiger Ausführung

[1]) Der Gegenstand ist in den „Vorschlägen für die Definition der Eigenschaften gestreckter Leiter" v. Diesselhorst und Emde (ETZ 1909, S. 1155, 1184) ausführlich erörtert.

mit einer Isolation aus getränktem Papier. k ist die Teilkapazität zwischen Leiter und Bleimantel, c die Teilkapazität zwischen Leiter und Leiter, beide in μF/km ausgedrückt (Abb. 23). Für Kabel mit sektorförmigem Leiterquerschnitt (Abb. 361, d) der aber nur für die Spannungen bis etwa 10000 V in Frage kommt, erhöhen sich die Kapazitäten um 15 bis 50%.

Teilkapazitäten von Dreileiterkabeln.

Betriebsspannung[1]) in Volt	Leiterquerschnitt in mm²	k $\frac{\mu F}{km}$	c $\frac{\mu F}{km}$
5000	25	0,120	0,045
	50	0,157	0,058
	95	0,195	0,073
	150	0,220	0,086
	240	0,235	0,096
10000	25	0,090	0,035
	50	0,115	0,041
	95	0,145	0,052
	150	0,170	0,062
	240	0,190	0,075
15000	25	0,077	0,029
	50	0,100	0,035
	95	0,125	0,045
	150	0,147	0,054

Betriebsspannung[1]) in Volt	Leiterquerschnitt in mm²	k $\frac{\mu F}{km}$	c $\frac{\mu F}{km}$
20000	25	0,070	0,023
	50	0,091	0,030
	95	0,114	0,039
	150	0,132	0,045
25000	25	0,064	0,019
	50	0,083	0,026
	95	0,104	0,035
	150	0,120	0,041
30000	50	0,073	0,022
	95	0,096	0,031
	150	0,110	0,036

e) **Betriebskapazitäten.** Hängen die Spannungen der Leiter so voneinander ab, daß sie alle durch die Angabe einer einzigen bestimmt sind, und gehorchen sie und auch die Lage der Leiter gewissen Symmetriebedingungen (kein Leiter soll bevorzugt sein), so ist auch ein Mehrleitersystem elektrostatisch durch eine einzige Kapazitätsgröße gekennzeichnet. Diese, die Betriebskapazität, gilt aber nur für die vorausgesetzte Betriebsart. Beispiel: Die Betriebskapazität eines verseilten Drehstromkabels, eines verseilten vieradrigen Zweiphasenkabels. Fertige Formeln für einige Betriebskapazitäten sind in den genannten Aufsätzen von Breisig, Lichtenstein und Diesselhorst und Emde enthalten.

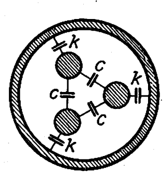


Abb. 23. Symmetrisches Dreileiterkabel mit runden Leitern.

Die Betriebskapazität einer symmetrischen Drehstromleitung ergibt das Verhältnis der Ladung eines Leiters zur Sternspannung. Sie ist doppelt so hoch wie die Kapazität der entsprechenden Doppelleitung [(45), Formel 6; (47) a]. Durch die Teilkapazitäten c und k ausgedrückt, lautet sie

$$C = k + 3c.$$

(48) Die **im elektrischen Felde aufgespeicherte Gesamtenergie** wird richtig erhalten, wenn man jedem Punkt des Feldes eine Energiedichte $\frac{1}{2}\,\mathfrak{D}\,\mathfrak{E} = \varepsilon\,\mathfrak{E}^2/8\pi c^2$ zuschreibt. Für einen Kondensator von der Kapazität C, der Ladung Q und der Spannung V ergibt das einen Energiebetrag $\frac{1}{2}\,Q\,V = \frac{1}{2}\,C\,V^2 = Q^2/2\,C$.

---

[1]) Gemeint ist die verkettete Drehstromspannung.

(49) Die **mechanischen Kräfte elektrischen Ursprungs** lassen sich als Raumkräfte (a) oder als Oberflächenkräfte (b) darstellen.

a) Auf das mit der Dichte η geladene Raumteilchen dv wirkt die Kraft

$$\mathfrak{K} = (\eta\,\mathfrak{E} + \mathfrak{E}^2 \operatorname{grad} \varepsilon / 8\pi c^2)\, dv\,.$$

In einem homogenen Körper fällt das zweite Glied weg; das erste ist die aus dem Coulombschen Gesetz folgende Kraft. Das zweite Glied besagt: Die Körper suchen sich so zu stellen, daß der Verschiebungsfluß im ganzen möglichst groß wird. (Vgl. das entsprechende Verhalten des Eisens im Magnetfeld (101a).)

b) Die Wirkung des Feldes auf einen Körper wird erhalten, wenn man sich an jedem Punkt seiner Oberfläche eine Spannung $\mathfrak{T}$ vom Betrag $\varepsilon\,\mathfrak{E}^2/8\pi c^2$ angreifend denkt. Der Winkel zwischen $\mathfrak{T}$ und der Oberflächennormale wird durch die Richtung von $\mathfrak{E}$ halbiert. Die Kraft auf das Oberflächenelement ist der Unterschied der nach außen und der nach innen wirkenden Spannung.

Den Zusammenhang zwischen Spannung, Feldstärke und Neigungswinkel zwischen Feldstärke und Oberflächenelement hat F. Emde eingehend erörtert (Elektr. u. Maschb., Wien 1910, S. 35) und Modelle zur Veranschaulichung angegeben (ebenda, 1916, Heft 12 u. 13).

Spezialfälle (Emde, Elektrot. u. Maschb. 1910, S. 33):

1. Zwischen zwei in einem homogenen Körper im Abstand r befindlichen elektromagnetisch gemessenen Punktladungen Q_1 und Q_2 wirkt die Kraft $Q_1 Q_2 c^2/\varepsilon r^2$ [Coulombsches Gesetz; vgl. (37)].

2. Hängt die Lage zweier Körper mit der Kapazität C nur von einer Koordinate (x) ab, so ist die zugehörige Kraftkoordinate bei konstanter Spannung $\frac{1}{2} V^2 \partial C/\partial x$.

3. Auf das Oberflächenelement df eines Leiters wirkt die normale Zugkraft $\varepsilon\,\mathfrak{E}^2 df/8\pi c^2$.

4. Auf eine kleine ungeladene leitende Kugel vom Volum v wirkt im elektrischen Felde $\mathfrak{E}_0$ die Kraft $\varepsilon v \operatorname{grad} \mathfrak{E}_0^2/8\pi c^2$.

(50) Durchbruchfeldstärke und Durchschlagspannung.

Die Spannung, bei der eine Entladung in Luft einsetzt (Anfangsspannung), hängt in erster Linie von der Gestalt des elektrischen Feldes ab. Maßgebend ist nicht nur der Wert der elektrischen Feldstärke an den Elektroden, sondern auch ihr weiterer Verlauf in das Feld hinein.

Im homogenen Felde zwischen ausgedehnten ebenen Elektroden ist die Durchbruchfeldstärke eine Funktion der Schlagweite und nimmt mit wachsender Schlagweite ab. Bei 760 mm Barometerdruck und 20° C beträgt sie[1])

für den Elektrodenabstand	0,1	1	11 cm
	44,5	31,7	26 kV/cm

Bei größeren Abständen nimmt sie nur wenig ab. Erklärt wird diese Erscheinung durch die Theorie der Ionisierung durch Stoß (81b).

Bei zylindrischen Elektroden ist die Durchbruchfeldstärke hauptsächlich vom Radius des Innenzylinders abhängig. Sie beträgt bei 760 mm und 20° C

für den Radius	0,1	1	15 cm
etwa	62,2	40	30,6 kV/cm

Bei Kugeln ist die Durchbruchfeldstärke abhängig von Radius und Abstand. Bei kleinen Abständen ist sie sehr groß (wie bei ebenen Elektroden), durchläuft mit wachsendem Abstand ein Minimum und erreicht darnach ein Bereich langsam veränderlicher Werte. Sie nimmt auch mit wachsendem Radius ab. In dem erwähnten Bereich beträgt die Feldstärke (Estorff) bei 760 mm und 20° C

für den Radius	1	5	12,5 cm
	46,7	34,9	31,9 kV/cm

---

[1]) Die angegebenen Werte sind Gleichspannungswerte und bei sinusförmigem Wechselstrom durch $\sqrt{2}$ zu dividieren.



sofern die Schlagweite bei großen Kugeln mindestens gleich dem Kugelradius, bei kleinen Kugeln mindestens gleich dem 2 bis 3fachen Kugelradius ist. Bei kleineren Schlagweiten sind die Durchbruchfeldstärken geringer, bis sie schließlich bei kleinsten Abständen sehr stark ansteigen.

Die Durchschlagspannungen sind proportional dem Luftdruck und umgekehrt proportional der absoluten Temperatur. Sie werden durch Regen stark (bei Kugelfunkenstrecken auf die Hälfte) herabgesetzt.

Die Kugelfunkenstrecke hat vor anderen den Vorteil, daß ihre Durchschlagspannung bis zu sehr hohen Frequenzen hinauf konstant ist (Algermissen) und auch für kurzzeitige Impulse denselben Wert hat (Peek). Die Überschlagspannung anderer Entladungsstrecken (z. B. von Hornableitern und namentlich von Spitzen) steigt dagegen bei kurzdauernden Impulsen stark an (Peek).

Die Spitzenfunkenstrecke wird ihrer Unzuverlässigkeit wegen nicht mehr angewendet; ihre Überschlagspannung hängt von der Schärfung der Spitzen, von der Feuchtigkeit, der Frequenz und Beanspruchungsdauer stark ab.

Literatur (dort auch Schlagweitenkurven): M. Toepler, ETZ 1907, S. 998, 1025. — J. Algermissen, Ann. d. Phys. (4), Bd. 19, 1906, S. 1016. — J. S. Townsend, Theory of ionization of gases by collision, 1910. — W. Weicker, ETZ 1911, S. 436. — Weidig und Jaensch, ETZ 1913, S. 637, 679. — P. W. Peek jr., Proc. Am. Inst. of El. Eng. 1914, S. 889; 1915, S. 1695. 1857; 1919, S. 717. — ETZ 1916, S. 246. — W. Estorff, Diss. Berlin 1915; ETZ 1916, S. 60, 76.

Weitere Angaben über die Abhängigkeit der Durchschlagspannung der Luft von der Entladungsform, der Elektrodenform und den atmosphärischen Verhältnissen findet man bei W. Weicker, ETZ 1911, S. 436.

Durchschlagspannungen fester Materialien werden gewöhnlich mit hochgespanntem Wechselstrom bestimmt und als Effektivwerte angegeben. Zahlen für die Durchschlagspannungen sind ziemlich unzuverlässig, da sie bei den meist inhomogenen Materialien von vielen Zufälligkeiten abhängen, auch gelten sie nur für die gerade gewählte Versuchsanordnung. Ohne genaue Angabe dieser sind Schlagweitengesetze wertlos. Eine besondere Art der Versuchsanordnung wird von Walter (ETZ 1903, S. 800) vorgeschlagen. Viele Einzelangaben von Durchschlagsspannungen finden sich bei Turner und Hobart: „Die Isolierung elektrischer Maschinen", Berlin 1906, und bei Petersen: „Hochspannungstechnik", Stuttgart 1911. Siehe auch H. Zipp, Handb. d. elektr. Hochspannungstechnik, Leipzig 1917.

Einen Anhalt für die Größenordnung einiger Durchschlagspannungen gibt die folgende Zusammenstellung; sie bezieht sich auf Stoffe, die zwischen parallelen Metallplatten durchgeschlagen wurden. Die obere Zahl bedeutet die effektive Durchschlagspannung in Kilovolt, die untere die durchgeschlagene Dicke in mm.

Stoff								
Paraffin	27/1,0	39/2,0	56/4,0	68/6,0	78/8,0	87/10,0	95/12,0	102/14,0
Hartporzellan			15/1,0	25/2,0	44/4,0	61/6,0	77/8,0	92/10,0
Vulk. Gummi				6,8/0,5	10/1,0	16,8/2,0	26/4,0	40/10,0
Glimmer				11,5/0,1	19/0,2	37/0,5	52/0,8	60/1,0
Mikanit					22/1,0	42/2,0	53/3,0	58/4,0
Imprägn. Jute					2,2/1,0	7/6,0	10,2/10,0	12,7/14,0
Glas						6,4/0,2	13/0,5	18/1,0

Stoff	
Ebonit	14/1,4
Preßspan	12/1,0
Rote Vulkanfiber	5/1,0
Papierisolation für Kabel	20/1,0
Transformatoröl	6 bis 10/1,0
Vaselinöl	130/10,0
Petroleum	95/10,0

Ausführliche Erörterungen über die experimentelle Ermittlung und Prüfung der elektrischen Festigkeit von Isolierstoffen finden sich bei A. Schwaiger, Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien (Berlin 1919), Kap. III.

Der elektrische Strom.

a) Metalle und metallisch leitende Körper.

(51) Eingeprägte Feldstärke. Im Innern homogener Leiter ist im Zustande des elektrischen Gleichgewichts (im elektrostatischen Felde) die Feldstärke $\mathfrak{E}=0$. In chemisch oder thermisch heterogenen Leitern besteht eine „eingeprägte" Feldstärke $\mathfrak{E}_e$, die von der Beschaffenheit des Leiters abhängt. Sie wird im Gleichgewichtszustand durch eine gleich große, aber entgegengerichtete elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ gerade aufgehoben: $\mathfrak{E}+\mathfrak{E}_e=0$.

(52) Strömung, Ohmsches Gesetz. Jede Abweichung der Feldstärke von dem soeben angegebenen Gleichgewichtswert ruft eine Strömung von der Dichte

$$\mathfrak{i}=\frac{1}{\varrho}(\mathfrak{E}+\mathfrak{E}_e)$$

hervor (Ohmsches Gesetz). ϱ ist der spezifische Widerstand des Materials, $\chi=1/\varrho$ der spezifische Leitwert oder die Leitfähigkeit. Die Stromlinien können nur dort entspringen oder münden, wo elektrische Ladungen sich ändern. An allen anderen Punkten ist also $\operatorname{div}\mathfrak{i}=0$.

(53) Energieumsatz. Die Strömung ist mit einer Erzeugung nichtelektrischer Energie verbunden, die in der Zeit $\mathrm{d}t$

$$\Psi\,\mathrm{d}t=\mathrm{d}t\int\mathfrak{E}\mathfrak{i}\,\mathrm{d}v=\mathrm{d}t\int(\varrho\mathfrak{i}^2-\mathfrak{E}_e\mathfrak{i})\,\mathrm{d}v$$

beträgt. Darin entspricht $\varrho\mathfrak{i}^2$ der in der Raum- und Zeiteinheit entstehenden Stromwärme (Joulesches Gesetz (61); sie ist stets positiv (irreversibler Energieumsatz). $\mathfrak{E}_e\mathfrak{i}$ ist die Abnahme der chemischen Energie bei galvanischen oder die verbrauchte Peltierwärme bei Thermoelementen; sie wechselt mit $\mathfrak{i}$ das Vorzeichen (reversibler Energieumsatz).

(54) Potential. Auch das elektrische Feld einer stationären Strömung ist überall wirbelfrei; die Feldstärke $\mathfrak{E}$ kann daher als Gefälle eines einwertigen Potentials dargestellt werden: $\mathfrak{E}=-\operatorname{grad}\varphi$.

(55) Lineare Leiter sind solche, deren Querschnittsabmessungen klein gegen die Länge sind (Drähte u. dgl.). Wenn q den Querschnitt, $|\mathfrak{i}|q=I$ den Gesamtstrom, $\int_a^b\mathfrak{E}\,\mathrm{d}\mathfrak{s}=\varphi(a)-\varphi(b)=V$ die Potentialdifferenz oder Spannung zwischen den Enden a und b des Leiters und $\int_a^b\mathfrak{E}_e\,\mathrm{d}\mathfrak{s}=E$ die im Stücke ab tätige elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet, so nimmt das Ohmsche Gesetz hier die Form an

$$\boldsymbol{V=RI-E},\quad\text{mit } R=\int_a^b\frac{\varrho\,|\mathrm{d}\mathfrak{s}|}{q}.$$

R ist der Widerstand des Leiters ab, $G=1/R$ sein Leitwert. Ist der Querschnitt überall derselbe, und ist l die Drahtlänge, so ist

$$\boldsymbol{R=\varrho l/q}.$$

Spezialfälle.

1. Für einen geschlossenen Kreis ist $V=0$, daher $E=RI$.
2. An den Enden eines Leiters, in dem keine EMK wirkt, ist die Spannung $V=RI$ (Ohmscher Spannungsfall).

3. Die Klemmenspannung einer galvanischen Zelle (eines Sammlers) ist $V_k = E - R_i I$ bei der Entladung, $V_k = E + R_i I$ bei der Ladung; R_i ist der innere Widerstand der Zelle.

Die in der Zeiteinheit im linearen Leiter erzeugte nichtelektrische Energie ist

$$\Psi = R I^2 - E I$$

$R I^2$ ist die Joulesche Wärmeleistung, $-EI$ die Zunahme der chemischen Energie oder Peltierwärme. Ψ wächst auf Kosten der elektrischen Energie (oder der magnetischen Energie; abgesehen von bewegten Körpern). Im Falle stationärer Strömung sind diese Energien konstant, daher $\Psi = 0$ oder $RI^2 = EI$ (Joulesche Wärme = Abnahme der chemischen Energie oder der Peltierwärme).

(56) Die Kirchhoffschen Sätze über die Stromverzweigung beziehen sich auf ein aus linearen Leitern in beliebiger Weise zusammengeschaltetes Netz.

1. In jedem Verzweigungspunkte ist die Summe der ankommenden Ströme gleich der Summe der abfließenden: $\sum I = 0$ (folgt aus $\operatorname{div} \mathfrak{i} = 0$).

2. Für jeden aus den Leitern zu bildenden geschlossenen Weg ist die Summe aller EMKe gleich der Summe aller Ohmschen Spannungsfälle: $\sum E = \sum RI$ (folgt aus dem Ohmschen Gesetz).

Aus diesen Sätzen folgt insbesondere:

a) eine aus den Widerständen $R_1, R_2, \ldots R_n$ gebildete Reihe hat den Gesamtwiderstand $R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$.

b) Schaltet man die Einzelwiderstände parallel, so ist der Gesamtwiderstand aus $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \cdots + 1/R_n$ zu berechnen.

Ist $R_1 = R_2 = \cdots R_n = R_0$, so wird $R = R_0/n$.

(57) In körperlich oder flächenhaft ausgedehnten Leitern muß die Stromverteilung aus den in (51) bis (54) angegebenen Beziehungen berechnet werden. Von einem Widerstande solcher Leiter kann man nur dann sprechen, wenn Lage und Beschaffenheit der Stromzuführungsstellen (Elektroden) gegeben sind, und wenn diese so klein sind oder so wenig Widerstand haben, daß von einem bestimmten Potential der Elektroden geredet werden kann[1]).

(58) Widerstände einiger ausgedehnten Leiter. 1. Isolationswiderstand gestreckter Leiter (siehe jedoch (78).

Die Ableitung $G = 1/R$ ist für ein *homogenes* Dielektrikum der Kapazität (44 bis 47) proportional; es gilt $G = 4\pi c^2 C/\varepsilon \varrho_{\text{abs}}$, wobei alle Größen in absolutem elektromagnetischem Maß ausgedrückt sind. Wenn man R in Ohm, d. h. G in Siemens, und C in Mikrofarad ausdrückt, so ist

$$G = \frac{1}{R} = \frac{36 \cdot 10^9 \pi}{\varepsilon \varrho_1} C,$$

ε = Dielektrizitätskonstante, ϱ_1 = spez. Widerstand für 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt $= 10^4 \varrho$ in Ω-cm $= 10^{-5} \varrho_{\text{abs}}$.

Sind mehr als zwei Leiter im Felde, so ergibt jede Teilkapazität nach dieser Formel die zugehörige Teilableitung.

2. Übergangswiderstände von Erdelektroden in einem unbegrenzten Medium

Kugel, Durchm. $= d$	$R = \varrho/2\pi d$,
Kreisplatte, Durchm. $= d$	$R = \varrho/4d$,
Zylindr. Walze, Durchm. $= d$, Länge $= nd$	$R = \dfrac{\varrho}{\pi d} \dfrac{\log \text{nat}\, 2n}{2n}$,
Rechteckige Platte, Länge der kleineren Seite a, der größeren Seite na	$R \approx \dfrac{\varrho}{a\pi\sqrt{N}} \log \text{nat} \dfrac{n+1+\sqrt{N}}{n+1-\sqrt{N}}$

[1]) Näheres bei Debye, Enzykl. d. Math. Wiss. Bd. V. Art. 17, § 6 bis 16, S. 401—425.

Dabei ist $N = (1+n)^2 - 8n/\pi$; Maße in cm; ϱ für Grund-(Fluß-)Wasser, bezw. nassen Boden ca. 10^4 Ω-cm, für trocknen Boden ca. 10^6 Ω-cm, für Seewasser ca. 10^2 Ω-cm.

(59) Temperatureinfluß. Der Widerstand der Metalle und Legierungen befolgt n mäßigen Temperaturgrenzen mit praktisch ausreichender Genauigkeit das Gesetz

$$R_t = R_o(1+\alpha t) = R_\vartheta \left[1 + \frac{\alpha}{1+\alpha\vartheta}(t-\vartheta)\right].$$

R_t, R_ϑ, R_0 = Widerstand bei t, ϑ, 0° C; α = Temperaturkoeffizient bei 0°; er beträgt für die meisten Metalle etwa 0,0035 bis 0,0045, für Legierungen stets viel weniger.

$\alpha_\vartheta = \alpha/(1+\alpha\vartheta)$ ist der Temperaturkoeffizient bei der Temperatur ϑ. Aus dem vorstehenden Ausdruck ergibt sich

$$\frac{1}{\alpha_\vartheta} = \frac{1}{\alpha} + \vartheta.$$

Der Widerstand der reinen Metalle nimmt fast linear mit der Temperatur ab und verschwindet nach Beobachtungen von Kamerlingh Onnes bei einer sehr tiefen, wenig über dem absoluten Nullpunkt liegenden Temperatur vollständig; bei dieser Temperatur kann man somit durch dünne Drähte beliebig starke Ströme schicken[1]).

Der spezifische Widerstand von Kohle, Siliziumkarbid, Karborund, Karbazilith, Silit u. dgl. nimmt mit wachsender Temperatur stark ab[2]).

(60) Spezifischer Widerstand. Man beachte, daß der spezif. Widerstand von Metallen so sehr von Beimengungen abhängig ist, daß genaue Zahlen, die man für die ganz reinen Metalle kennt, oder Beispiele von Werten für verunreinigte Metalle oder für Legierungen hier nur verhältnismäßig geringen Wert haben.

Metalle, Legierungen, Kohle. $R = \varrho \cdot \frac{l}{q}$; R in Ohm, l in Metern, q in Quadratmillimetern, spezifischer Widerstand ϱ und Temperaturkoeffizient α für 20°.

Spezifischer Widerstand.

	ϱ	1000α		ϱ	1000α
Aluminium	0,03—0,04	3,6	Silber	0,016	3,6
Aluminiumbronze	0,12	1	Stahl	0,10—0,25	5,2
Antimon	0,45	4,1	Tantal	0,15	3,3
Blei	0,21	4,2	Wismut	1,2	4,2
Cadmium	0,076	4,0	Wolfram	0,055	4,1
Eisen	0,10—0,15	4,5	Zink	0,063	3,7
Elektron	0,063	2,2	Zinn	0,10	4,2
Gold	0,23	4,0	Kohle (Retortenkohle, Graphit)	ca. 100	—0,2 bis —0,8
Iridium	0,053	4,1			
Kupfer	0,0175	3,9	Kohlenstifte für Bogenlampen:		
Magnesium	0,045	3,9			
Messing	0,07—0,09	1,5	Homogenkohlen	55—78	
Neusilber	0,15—0,40	0,2—0,6	Dochtkohlen	57—88	
Nickel	0,08—0,11	4,0	Kohlenfäden für Glühlampen:		
Osmium	0,095	4			
Palladium	0,11	3,8	roh	35	
Platin	0,11—0,14	2 bis 3	mit Kohleniederschlag	25	
Quecksilber	0,96	0,92			
Rhodium	0,06	4,4			

1) J. Dewar, Proc. Roy. Soc. Bd. 68, S. 360, 1901. — C. Niccolai, Atti della Acad. dei Lincei, 1907. — Kamerlingh Onnes, Communicat. Physical. Laborat. Leiden, namentlich Nr. 133c, 1913. Zahlenwerte und weitere Literatur in Landolt-Börnsteins physikal.-chem. Tabellen, 4. Aufl. 1912.

2) Bis zu einem Minimum, nach J. Koenigsberger und O. Reichenheim, Phys. Zeitschr. Bd. 7, S. 570, 1906; J. Koenigsberger und K. Schilling Ann. Phys. Bd. 32, S. 179, 1910. Siehe ferner „Handwörterbuch der Naturwissenschaften", Bd. 3, S. 351 ff. Jena 1913.

Drähte für Freileitungen.

	ϱ	Festigkeit kg*/mm²		ϱ	Festigkeit kg*/mm²
Hartkupfer . . .	0,017	42—45	Bronze	0,019—0,022	50—55
Bronze	0,018	46	Bronze	0,025—0,056	70—90

Legierungen als Widerstandsmaterialien.

Nach Angaben der Fabrikanten. Die Messungen rühren größtenteils von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt her; sie gelten nur für die untersuchten Stücke genau, für die im Handel gelieferten Materialien aber nur angenähert.

Bezugsquelle	Nummer	Material	ϱ	α	spez. Gew.	Festigkeit kg*/mm²	feinster Draht mm
Basse & Selve, Altena (Westf.)	1	Konstantan	0,49	—0,000005	8,82	hart 83	0,10
						weich 48	,,
	2	Nickelin	0,43	0,00023	8,74	hart 90	,,
						weich 49	,,
	3	Nickelin-Neusilber	0,36	0,00017	8,75	hart 84	0,05
						weich 41	,,
Vereinigte Deutsche Nikkelwerke Akt.-Ges. vormals Westfäl. Nickelwalzwerk, Fleitmann, Witte & Co., Schwerte, Westf.	4	Widerstandsdraht „Superior"	0,86	0,00073	8,5	—	0,10
	5	„ Ia. Ia., hart	0,50	—0,00001	bis	75	0,05
	6	„ „ weich	0,47	0,00001	9,0	40	,,
	7	Nickelin Nr. 1, hart	0,44	0,00008		70	,,
	8	,, ,, weich	0,41	0,00017		40	,,
	9	,, Nr. 2, hart	0,34	0,00018		70	,,
	10	,, ,, weich	0,32	0,00019		40	,,
	11	Neusilber 2a., hart	0,37	0,00020		65	,,
	12	,, ,, weich	0,37			45	,,
	13	Blanca-Extra	0,48	0,00015		—	,,
	14	Chromin hart	0,82	0,00026		100	0,10
		,, weich	0,85	0,00026		70	0,10
Dr. Geitners Argentanfabrik, F. A. Lange, Auerhammer, Sachs.	15	Rheotan	0,48	0,00023	8,9		0,10
	16	Rheotan CN	0,48	—0,00003			0,10
	17	Rheotan S	0,72	0,00004	bis		0,10
	18	Nickelin	0,40	0,00016			0,10
	19	Extra Prima Neusiber	0,30	0,00025	9,0		0,10
Isabellenhütte bei Dillenburg	20	Manganin	0,43	±0,00001	8,3	45	0,03
	21	Resistin[3])	0,50	±0,00002	8,3	45	0,06
Fried. Krupp, A.-G., Essen	22	Kruppsches Widerstandsmaterial	0,85	[4]) 0,00077	8,10	60	0,5
	23	WTII-Widerstandsmaterial für hohe Temperat.	1,00	0,00025	8,25	70	0,5
C. Schniewindt, Neuenrade in Westfalen	24	Exzelsior I	0,86	0,0007	8,7		0,10
	25	Konstantan	0,50	0,000005	bis		,,
	26	Rheostatin	0,48	0,000011	9,1		,,
	27	Nickelin	0,40	0,0001			,,
	28	Exzelsior II	0,058	0,0014			,,

Zusammensetzung einiger der angeführten Materialien nach Gewichtsprozenten (abgerundet).

Nr. 1: 58 *Cu*, 41 *Ni*, 1 *Mn*,
,, 2: 54 *Cu*, 26 *Ni*, 20 *Zn*,
,, 20: 84 *Cu*, 4 *Ni*, 12 *Mn*.

Der spezifische Widerstand wird häufig nach Mikrohm-Zentimeter gemessen; er ist dann gleich dem Widerstand eines Würfels von 1 cm Seite in Milliontel-Ohm = dem Hundertfachen der in den vorstehenden Tabellen unter ϱ enthaltenen Werte. Multipliziert man diese mit 10^5, so erhält man ϱ in absoluten elektromagnetischen CGS-Einheiten.

[3]) Nickelfreies Widerstandsmaterial.
[4]) Zwischen 18 und 150° C.



C. Schniewindt, Neuenrade i. W., liefert Widerstandskörper aus einem Gewebe bzw. Geflecht von Widerstandsdrähten oder Plätte mit Asbestfäden in Form von Gittern, Bändern, Kordeln und Schläuchen.

Die Maximalbelastungen beziehen sich auf die günstigsten Abkühlungsverhältnisse; baut man die Bänder in Apparate ein, so wird man sie je nach der Dauer der Belastung und nach den Abkühlungsverhältnissen nur mit der Hälfte bis zu zwei Dritteln der angegebenen Stromwerte belasten dürfen. Für Widerstände mit sehr geringer Belastungsdauer (Anlasser, Überspannungsschutzwiderstände) setzt man die Bänder unter Öl und darf sie dann bedeutend stärker belasten.

Widerstandsbänder Nr. 42 aus Konstantandraht (Schniewindt).

Drahtdurchmesser mm	0,10	0,13	0,15	0,18	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
Maximalbelastung in A, ca.	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,75	1,0	3	5	6	7	8	9	10	11	12
Widerstand bei 100 mm Breite in Ω/m	7500	5200	2000	1500	1200	800	400	200	120	80	45	32	23	17	11	7
Widerstand bei 60 mm Breite in Ω/m	4500	3100	1200	900	750	480	240	120	72	48	27	19	14	10	6,5	4,2

Größte Fabrikationslänge 20 bis 50 m, je nach der Drahtstärke; größte Fabrikationsbreite 1 m.

Die Widerstandskordel Nr. 60 wird mit einem Durchmesser von

etwa	1,5	3	5	7	10	12	15	mm

und mit einem Widerstand von etwa

minimal	16	1,0	1,5	2,4	3,5	4,0	4,5	Ω
maximal	800	1400	800	1100	1700	1900	2500	Ω

bei einer Belastung von etwa 0,04 bis 12 A geliefert.

Hartmann & Braun Akt.-Ges. in Frankfurt (Main) liefern unter dem Namen „Haardrähte" feine gezogene (nicht nach dem Wollastonverfahren hergestellte) Drähte von 0,2 bis herab zu 0,015 mm Durchmesser aus Silber, Kupfer, Aluminium, Zink, Gold, Messing, Nickel, Eisen, Platin, Platinsilber, Platiniridium, Phosphorbronze, Stahl, Manganin, Konstantan, Kulmitz, Kruppin, Neusilber, Nickelin. Die Widerstände gehen bis 2850 Ω/m. Außerdem werden Wismutdrähte von 0,06 bis 2 mm Durchmesser und sogenannte Wollastondrähte geliefert. Nach Wollaston umgibt man zur Herstellung feinster Gold- und Platindrähte den auszuziehenden Draht mit einer Silberhülle und zieht ihn mit dieser durch Diamantlochsteine auf geringstmögliche Dicke. Die verbleibende Silberhülle ist vor Benutzung der Drähte auf chemischem Wege zu entfernen.

Durchmesser der Gold- oder Platinseele, mm	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,004	0,005	0,0075	0,01
Äußerer Durchmesser, etwa mm	0,015	0,02	0,09	0,11	0,14	0,15	0,10	0,08

Die Leonischen Werke Roth-Nürnberg A.-G. in Nürnberg, liefern Flachdraht (Plätte, Bänder) aus Widerstandsdraht Ia. Ia. von Fleitmann, Witte & Co. in Schwerte i. W. glatt und gewellt (gekrüpft) von 1 bis 700 Ω/m. Die stärkste Plätte ist ca. 2,80 mm, die dünnste ca. 0,12 mm breit, und die Dicke beträgt $^1/_{25}$—$^1/_{20}$ der Breite. Plätte in denselben Abmessungen wird von C. Schniewindt, Neuenrade i. W. geliefert.

(61) Erwärmung von Leitungen (J o u l e s Gesetz). In einem Draht vom Widerstande R Ohm, durch den I Ampere fließen, entsteht während t Sekunden eine Stromwärme von

$$Q = 0{,}239\, I^2 R t \text{ Grammkalorien}$$[1].

Wegen der Wahl des Leitungsquerschnitts mit Rücksicht auf die Erwärmung siehe den Abschnitt „Leitung und Verteilung".

(62) Das Wesen der Stromleitung in Metallen wird nach E. R i e c k e, P. D r u d e, J. J. T h o m s o n und H. A. L o r e n t z dadurch erklärt, daß in den metallisch leitenden Körpern f r e i e E l e k t r o n e n (Atome negativer Elektrizität) vorhanden sind, die sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes bewegen. Näheres bei M. A b r a h a m, Theorie d. Elektriz. Bd. II, S. 270, § 32, 1908; E. R i e c k e, Phys. Zeitschr. Bd. 10, S. 508, 1909 und besonders in der zusammenfassenden Darstellung von K. B a e d e k e r, „Elektrische Erscheinungen in metallischen Leitern", Braunschweig 1911.)

(63) Thermoelektrische Kräfte. Wenn in einem Leiter, der aus zwei oder mehreren verschiedenen Metallen (oder aus physikalisch verschieden beschaffenen Stücken desselben Metalls, z. B. einem harten und einem weichen Draht) besteht, die Verbindungsstellen der Metalle ungleiche Temperaturen besitzen, so entsteht eine EMK. Diese Kraft, Thermokraft, ist von der Natur der in Berührung gebrachten Metalle abhängig und wächst im allgemeinen mit der Temperaturdifferenz der Berührungsstellen. Bei sehr starken Erhitzungen (der einen Verbindungsstelle, während die andere abgekühlt bleibt) wird indes für viele Kombinationen von Metallen die EMK wieder geringer, ja sie kann ganz verschwinden und bei noch weiter gehender Erhitzung von neuem, aber mit entgegengesetzter Richtung auftreten.

Die Metalle und Metallegierungen lassen sich in eine thermoelektrische Spannungsreihe ordnen, welche zunächst nur für mäßige Erhitzungen gilt. Die Stellung der einzelnen Metalle in dieser Reihe ist aber von geringen Beimengungen, die sie enthalten können, abhängig. Die folgende Tabelle gibt die thermoelektrische Kraft eines Metallpaares, wenn die eine Lötstelle sich auf 0°, die andere auf 100° befindet, in Millivolt als Differenz der beigesetzten Zahlen.

Wismut	0	Quecksilber	6,7	Silber	7,4
Konstantan	3,0	Aluminium	7,1	Kupfer	7,4
Patentnickel	3,8	Blei	7,1	Zink	7,5
Nickel	5,1	Zinn	7,1	Cadmium	7,6
Palladium	6,1	Messing	7,1	Eisen	8,3
Platin	6,6	Gold	7,2	Antimon	10,0

Hieraus ergibt sich z. B. die thermoelektrische Kraft eines Kupfer-Konstantanelements zu 7,4 − 3,0 = 4,4 mV für 100° Temperaturunterschied der beiden Lötstellen.

Der positive Strom fließt in der wärmeren Lötstelle in der Richtung Wismut —Antimon.

Zur Messung h o h e r T e m p e r a t u r e n ist das von der Firma H e r a e u s, Hanau, angefertigte Thermoelement nach L e C h a t e l i e r aus Platin und Platin-Rhodium (10% Pt-Rh, 90% Pt) gebräuchlich. Befindet sich die eine Lötstelle auf 0°, die andere auf t°, so gilt im Mittel nach H o l b o r n und V a l e n t i n e r (Ann. d. Phys. (4) Bd. 22, 1907, S. 27)

t =	100	200	300	400	500	600	700	800°
EMK =	0,6	1,4	2,25	3,17	4,13	5,14	6,17	7,25 mV

t =	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500°
EMK =	8,34	9,47	10,62	11,8	13,0	14,1	15,3 mV

[1]) Der Zahlenwert des AEF (ETZ 1910, S. 598) ist 0,23865; nach den neuesten Messungen der Phys. Techn. Reichsanstalt (vgl. S. 14 Fußnote) ergibt sich 0,2390.

Richtlinien für die Brauchbarkeit verschiedener Thermoelemente zur Messung hoher Temperaturen hat die Physikalisch-Techn. Reichsanstalt aufgestellt; Zeitschr. f. Instr. Bd. 38, 1918, S. 97.

Die Umwandlung der Wärme in elektrische Arbeit in einem Thermoelement ist ein umkehrbarer Vorgang (53): das bei der Stromentnahme sich ausgleichende Temperaturgefälle entsteht von neuem, wenn man die Stromrichtung umkehrt; der Strom schafft sich dann selbst eine Gegen-EMK (Peltierwirkung).

Auch in vielen homogenen Leitern treten Thermokräfte auf, wenn ein Temperaturgefälle in ihnen besteht. Die Thermokraft ist diesem Gefälle proportional; in einigen Stoffen hat sie die Richtung des Temperaturgefälles, in anderen die entgegengesetzte (Thomsonwirkung).

b) Elektrolyte.

(64) Elektrolytische Leitfähigkeit. Salze, Säuren und Basen bzw. Oxyde (Leiter zweiter Klasse) leiten gelöst in Wasser (und einigen anderen Lösungsmitteln) sowie in geschmolzenem Zustande die Elektrizität unter gleichzeitiger chemischer Zersetzung. Für die elektrolytisch leitenden Substanzen gilt das Ohmsche Gesetz. Der Widerstand R ist proportional der Länge l (gemessen in cm) und umgekehrt proportional dem Querschnitte q, gemessen in cm², sowie der Leitfähigkeit oder dem spezifischen Leitwert $\varkappa$, also: $R = l/\varkappa q$. Als Einheit der Leitfähigkeit gilt die Leitfähigkeit eines Körpers, dessen Würfel mit der Kantenlänge von 1 cm den Widerstand von 1 Ω besitzt. Die Leitfähigkeit nimmt in der Regel mit steigender Temperatur zu, und zwar etwa um 2% für 1°.

(65) Äquivalentleitvermögen (F Kohlrausch). Enthält eine Lösung von der Leitfähigkeit $\varkappa$ in 1 cm³ η Grammäquivalente des Elektrolyts, so ist ihr Äquivalentleitvermögen: $\Lambda = \varkappa/\eta$.

Wässerige Lösungen bei 18°.

	Äquivalentleitvermögen			Leitfähigkeit. Länge und Querschnitt des Leiters in cm und cm², Gehalt in Gewichtsprozenten		
$1000\,\eta$	1,0	0,1	0,001	5%	10%	20%
KCl	98,27	112,03	127,34	0,069	0,136	0,268
NaCl	74,35	92,02	106,49	0,0672	0,1211	0,196
NH_4Cl	97,0	110,7	127,3	0,0918	0,1776	0,3365
KNO_3	80,46	104,79	123,65	0,0454	0,084	0,151
$NaNO_3$	65,86	87,24	102,85	0,044	0,078	0,130
$AgNO_3$	67,6	94,33	113,15	0,0256	0,0476	0,0872
$^1/_2\ K_2SO_4$	71,6	94,9	126,9	0,0458	0,0860	—
$^1/_2\ Na_2SO_4$	50,8	78,4	106,7	0,0409	0,0687	—
$^1/_2\ BaCl_2$	70,14	90,8	115,6	0,0389	0,0733	0,1331
$^1/_2\ MgSO_4$	28,9	49,7	99,8	0,0263	0,0414	0,0476
$^1/_2\ CuSO_4$	25,8	43,85	98,54	0,0189	0,0320	—
$^1/_2\ ZnSO_4$	(26,6)	45,34	98,40	0,0191	0,0321	0,0468
$^1/_2\ CdSO_4$	23,58	42,21	97,72	0,0146	0,0247	0,0388
KOH	184	213	(234)	—	—	—
NaOH	157,0	195,4	—	0,197	0,312	0,327[1]
HCl	301	351	(377)	0,395	0,6302	0,7615
HNO_3	310	350	(375)	—	—	—
$^1/_2\ H_2SO_4$	198	225	361	0,209	0,392	0,653

[1]) bei 15°.

(66) Elektrolytische Dissoziation (Arrhenius). Die nichtleitenden Moleküle eines Elektrolyts sind in Lösung bis zu einem gewissen mit der Verdünnung zunehmenden Bruchteil (Dissoziationsgrad γ) in elektrisch geladene, die Stromleitung besorgende Teilmoleküle (Ionen) gespalten. Das Verhältnis der Leitfähigkeit bei einer bestimmten Konzentration Λ_η zu der bei unendlicher Verdünnung Λ_∞ ergibt den Dissoziationsgrad, also: $\gamma_\eta = \Lambda_\eta / \Lambda_\infty$.

Ionen mit 1 oder mehr positiven Ladungen (Kationen) sind Wasserstoff, die Metalle und die Gruppe NH_4. Ein- oder mehrfach negativ geladene Ionen (Anionen) sind die Halogene, die Säureradikale OH^-, NO_3^-, $SO_4^{=}$, ClO_3^-, NO_2^-, $PO_4^{\equiv}$ und viele andere.

(67) Wirkungen des Stromes auf das Elektrolyt. Taucht man zwei metallisch leitende Elektroden in die Lösung eines Elektrolyts oder in ein geschmolzenes Elektrolyt und schickt einen Strom hindurch, so wandern die Kationen in der Richtung des Stromes zur Kathode, die Anionen zur Anode und werden daselbst abgeschieden, wobei sie in den ungeladenen Zustand übergehen.

Erstes Gesetz von Faraday. Die abgeschiedene Menge m der Ionen ist proportional der durch das Elektrolyt hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge Q (oder prop. der Stromstärke I und der Dauer t des Stromschlusses).

Atom- und Äquivalentgewichte und elektrochemische Äquivalente.

Element	Zeichen	Atomgewicht	Valenz	Äquivalentgewicht	Elektrochem. Äquivalent für 1 C. mg	Elektrochem. Äquivalent für 1 Ah g
Aluminium	Al	27,1	3	9,03	0,0936	0,337
Blei	Pb	207,20	2	103,60	1,0735	3,865
Brom	Br	79,92	1	79,92	0,8282	2,982
Cadmium	Cd	112,40	2	56,20	0,5824	2,097
Chlor	Cl	35,46	1	35,46	0,3675	1,323
Eisen	Fe	55,87	2	27,94	0,2895	1,0425
,,			3	18,627	0,1931	0,695
Gold	Au	197,2	3	65,7	0,681	2,452
Jod	J	126,92	1	126,92	1,3153	4,735
Kalium	K	39,10	1	39,10	0,4052	1,459
Kohlenstoff	C	12,005	4	3,001	0,0311	0,1119
Kupfer	Cu	63,57	1	63,57	0,6588	2,372
,,			2	31,78	0,3294	1,186
Natrium	Na	23,00	1	23,00	0,2384	0,858
Nickel	Ni	58,68	2	29,34	0,3041	1,095
,,			3	19,56	0,2027	0,730
Platin	Pt	195,2	4	48,80	0,5057	1,820
Quecksilber	Hg	200,6	1	200,6	2,0787	7,481
,,			2	100,3	1,0393	3,742
Sauerstoff	O	**16,000**	2	8,000	0,0829	0,2985
Schwefel	S	32,06	2	16,035	0,1662	0,5981
Silber	Ag	107,88	1	107,88	**1,11800**	4,025
Stickstoff	N	14,01	3	4,67	0,0484	0,1742
Wasserstoff	H	1,008	1	1,008	0,01045	0,03762
Zink	Zn	65,37	2	32,685	0,3387	1,219
Zinn	Sn	118,7	2	59,35	0,614	2,214
,,			4	29,67	0,307	1,107

Zweites Gesetz von Faraday. Durch die gleiche Elektrizitätsmenge werden von verschiedenen Stoffen Mengen abgeschieden, welche im Verhältnisse ihrer Äquivalentgewichte stehen.

Die Menge eines Körpers, die durch die Einheit der Elektrizitätsmenge abgeschieden wird, heißt sein elektrochemisches Äquivalent α. Die Konstante α z. B. für 1 mg/C) erhält man, indem man das chemische Äquivalent durch 10^{-3} F = 96,494 (Valenzladung; vgl. S. 15) dividiert. Dies ergibt für beide Gesetze den Ausdruck:

$$m = \alpha \cdot Q = \alpha \int I\,dt.$$

Die Faradayschen Gesetze werden zur Messung von Elektrizitätsmengen benutzt (siehe Voltameter (157)).

(68) Überführungszahlen (Hittorf). Die Geschwindigkeit, mit der die Ionen unter dem Einflusse des Stromes wandern, hängt ab 1. von den spez. Beweglichkeiten u und v der Ionen und 2. von dem in der Lösung herrschenden Spannungsgefälle (V/cm), welch letzterem prop. sie wächst. Das Verhältnis der Zahl der Anionen (Kationen), d. h. der sich in der Richtung von der Kathode zur Anode (bzw. von der Anode zur Kathode) durch einen Querschnitt des Elektrolyts bewegenden Ionen zu der Gesamtzahl der ausgeschiedenen Anionen (Kationen) heißt die Überführungszahl des Anions ν (bzw. Kations $1-\nu$). Das Verhältnis der Beweglichkeiten ist gleich dem Verhältnis der Überführungszahlen: $u/v = (1-\nu):\nu$.

(69) Unabhängige Wanderung der Ionen (Gesetz von Kohlrausch)[1]. Bei sehr großer Verdünnung ist die Summe der Ionengeschwindigkeiten gleich der Leitfähigkeit der Lösung: $\Lambda_\infty = u + v$. Für konzentriertere Lösungen, in denen die Dissoziation noch nicht vollständig ist, gilt $\Lambda_\eta = \gamma_\eta (u+v)$. Man kann hiernach aus den Beweglichkeiten gleichwertiger Ionen die Leitfähigkeit beliebiger Lösungen annähernd berechnen.

Ionenbeweglichkeiten in wässeriger Lösung bei 18°[2].

u und v in cm/s bei 1 V/cm Spannungsgefälle.

Kationen				Anionen			
Ion	u	Ion	u	Ion	v	Ion	v
K	64,6	$^1/_2$ Sr	51	Cl	65,5	JO_3	33,9
Na	43,5	$^1/_2$ Ca	51	Br	67,0	JO_4	47,7
Li	33,4	$^1/_2$ Mg	45	J	66,5	$C_2H_3O_2$	35,0
NH_4	64,4	$^1/_2$ Zn	46	F	46,6	OH	174
Ag	54,3	$^1/_2$ Cd	46	NO_3	61,7	$^1/_2$ SO_4	68
H	315	$^1/_2$ Cu	46	ClO_3	55,0	$^1/_2$ CrO_4	72
$^1/_2$ Ba	55	$^1/_2$ Pb	61	ClO_4	64,7	$^1/_2$ C_2O_4	63

(70) Zersetzungsspannung (Le Blanc)[3] ist die kleinste Spannung, bei welcher die Bestandteile des Elektrolyts an den Elektroden zur Abscheidung gelangen, und bei welcher der Strom mit wachsender Spannung stärker zunimmt als unterhalb derselben.

(71) Überspannung. Bei Gasentwicklung auch an unangreifbaren Elektroden durch Strom ist die Zersetzungsspannung von dem Material der Elektroden abhängig und kann die umkehrbare Spannung um mehrere Zehntel-Volt übertreffen. Nach Nernst[4] muß das abgeschiedene Gas, bevor es in Blasen entweichen

---

[1]) Wied. Ann. Bd. 6, S. 1 (1879); Bd. 26, S. 161 (1885).
[2]) Nach Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik, 11. Aufl. 1910.
[3]) Zeitschr. f. phys. Ch., 8, S. 299 (1891); 12, S. 333 (1892).
[4]) Theoretische Chemie, VII. Aufl., 1913, S. 793.

kann, vorher bis zu einer von der Löslichkeit des Gases in dem Elektrodenmetall abhängigen Konzentration in die Elektrode hineingepreßt werden. Der Betrag dieser nicht umkehrbaren Überspannung steht in umgekehrtem Verhältnis zur Löslichkeit des Gases in der Elektrode.

Von praktischer Bedeutung ist die Überspannung z. B. beim Bleiakkumulator, wo sie das Eintreten schädlicher Lokalaktionen verhindert, da die Bleielektrode sich unter Wasserstoffentwicklung in Bleisulfat verwandeln müßte, wenn nicht die Überspannung der Wasserstoffentwicklung am Blei größer wäre als das Potential des Bleies gegen die Schwefelsäure. Wird die Überspannung durch Berühren der Bleielektrode mit einem Platindraht aufgehoben, so geht die Oxydation des Bleies unter lebhafter Wasserstoffentwicklung am Platin vor sich. Bei der elektrolytischen Darstellung chemischer Präparate können Reduktions- und Oxydationsvorgänge durch die Überspannung an geeignet gewählten Elektroden günstig beeinflußt werden.

(72) Polarisation. Wird ein Element (Akkumulator) oder ein Bad in der einen oder anderen Richtung von einem Strom durchflossen, so entsteht eine der stromliefernden entgegengesetzt gerichtete EMK, die sogenannte Polarisation, die durch Anwendung von Depolarisatoren beseitigt werden kann. Verursacht wird die Polarisation

1. durch Abscheidung von Stoffen, die der Lösung gegenüber ein anderes Potential haben als die Elektrode selbst,

2. durch Konzentrationsänderungen in dem Elektrolyt, die hauptsächlich infolge Auflösung der Elektroden bzw. Abscheidung an ihnen entstehen, die aber auch durch verschieden schnelle Wanderung der Ionen bedingt werden können.

(73) Depolarisatoren sind gelöste, gasförmige oder feste Stoffe, welche die an den Elektroden auftretenden Produkte durch chemische Bindung bzw. durch Entfernung aus der Lösung elektromotorisch unwirksam machen oder welche eine Abnahme der Konzentration durch Nachlieferung verhindern und zwar in folgender Weise:

1. Oxydationsmittel verhindern den Übergang von Kationen in den elementaren Zustand. Solche sind a) O_2, Cl_2 usw.

b) chemische Verbindungen (Superoxyde), welche leicht O_2, Cl_2 usw. abgeben und die metallisch leiten (PbO_2, MnO_2),

c) gelöste Salze von Metallen mit mehreren Oxydationsstufen, die unter Verringerung ihrer Valenzzahl und Abgabe positiver Ladungen oxydierende Elemente abgeben, z B.: $2\,Fe^{+++} + 6\,Cl^- = 2\,Fe^{++} + 4\,Cl^- + Cl_2$.

2. Reduktionsmittel verhindern die Abscheidung von Anionen; solche sind

a) H_2 oder Anoden aus unedlem Metall,

b) chemische Verbindungen (Suboxyde), besonders auch organische Substanzen, welche leicht H_2 abgeben oder Anionen aufnehmen,

c) gelöste Salze von Metallen, die leicht von einer niederen Oxydationsstufe in eine höhere übergehen und dabei einen Teil des Metalls als Reduktionsmittel abgeben, z. B.: $2\,Sn^{++} + 4\,Cl^- = Sn^{++++} + 4\,Cl^- + Sn$.

Die Oxydations- bzw. Reduktionskraft einer Anzahl Substanzen ist in der folgenden Tabelle durch ihre Potentiale zahlenmäßig dargestellt, wobei das Potential des übermangansauren Kalis als Nullpunkt gewählt ist.

3. In Elementen mit nur einer Lösung, welche ein Salz der einen Elektrode (Anode) enthält, muß die andere Elektrode (Kathode) von einem schwer löslichen Salze dieser letzteren umgeben sein, das für eine kleine, durch seine Löslichkeit bestimmte Konzentration an Kationen der zweiten Elektrode sorgt, die durch den Strom dauernd abgeschieden, immer wieder aus dem festen Salze ergänzt werden. Beispiele hierfür sind das Clark- und Westonelement, bei denen am Hg-Pol Merkurosulfat als Depolarisator wirkt.

Relative Reduktions- und Oxydations-Potentiale [1]).

Substanz	*E* Volt	Substanz	*E* Volt
$SnCl_2$ in KOH	2,06	Ferrizyankalium	0,78
Ferrozyankalium	1,29	Kaliumbichromat	0,70
Jod in KOH	1,28	$FeCl_3$	0,52
$SnCl_2$ in HCl	1,27	HNO_3	0,51
Cu_2Cl_2	1,20	Br_2 in KOH	0,45
Na_2SO_3	1,18	$KClO_3$ in H_2SO_4	0,35
Na_2HPO_3	1,17	MnO_2 in HCl	0,14
$FeSO_4$	1,13	Cl_2 in KCl	0,10
Jod in Jodkalium	0,88	$KMnO_4$ in H_2SO_4	0,00

(74) Umkehrbare Elektroden. Sollen die chemischen Umsetzungen, die in einem Elemente, einem Akkumulator oder bei einer Elektrolyse während des Stromdurchganges stattfinden, das Maximum der Arbeit leisten bzw. mit einem minimalen Aufwand an äußerer Arbeit bewerkstelligt werden, so müssen die Elektroden sogenannte umkehrbare Elektroden sein, d. h. es darf bei Umkehr der Stromrichtung durch die gleiche Elektrizitätsmenge und unter Aufwendung der gleichen Spannung nur gerade die Reaktion rückgängig gemacht werden, welche bei der anfänglichen Stromrichtung stattgefunden hat, und es dürfen außerdem keinerlei andere Umsetzungen eintreten. Man unterscheidet zwei Arten solcher Elektroden:

1. Elektroden erster Art (d. h. Elektroden, die in bezug auf das Kation umkehrbar sind): Das Elektrodenmetall taucht in eine Lösung eines seiner Salze, dessen Konzentration so groß ist, daß es die Stromleitung besorgen kann, und daß immer genug Metallionen in der Umgebung der Elektrode vorhanden sind, welche entladen und abgeschieden werden können.

2. Elektroden zweiter Art (d. h. Elektroden, die in bezug auf das Anion umkehrbar sind): Das Elektrodenmetall taucht in eine Lösung eines fremden Salzes, ist aber umgeben von einem festen schwerlöslichen Salze, das aus dem Metall der Elektrode und dem Anion des fremden Salzes zusammengesetzt ist. Bei Stromdurchgang in der einen oder anderen Richtung wird das Anion geladen oder entladen, während das Metall, ohne in Lösung zu gehen, direkt mit dem Anion reagiert.

Für jede umkehrbare Elektrode muß die Konzentration der umgebenden Lösung so gewählt werden, daß durch Lokalaktion kein anderes Kation auf der Elektrode niedergeschlagen wird, insbesondere daß keine Wasserzersetzung eintritt, d. h. es muß der Ausdruck $\sqrt[n]{C/c}$ für die Elektrode und ihre Ionen kleiner sein als die entsprechende Größe für jedes andere in Frage kommende Ion. Die Tabelle (S. 58) gibt hierfür einen guten Anhalt.

3. Normalelektroden sind umkehrbare Elektroden, die zur Untersuchung der Spannung einer Elektrode allein und unabhängig von dem Spannungsverluste (IR) in der Lösung dienen. Sie bestehen meist aus Hg, das von einem seiner schwerlöslichen Salze (Hg_2SO_4 in verdünnter H_2SO_4, HgCl in verdünnter KCl-Lösung) überschichtet ist. Zum gleichen Zweck werden die Wasserstoffelektrode (Platin in verdünnter Säurelösung) und für technische Zwecke Zn in $ZnSO_4$-Lösung von passender Konzentration gebraucht.

(75) Berechnung elektromotorischer Kräfte I. Thermodynamische Theorie. Die Arbeit, welche beim Stromdurchgange durch ein Elektrolyt gewonnen oder aufgewendet wird, beträgt für 1 Grammäquivalent $E \cdot F$ Wattsekunden (Spannung × Elektrizitätsmenge/Äquivalent). Ganz allgemein gilt nach

[1]) S. Arrhenius, Lehrbuch der Elektrochemie, 1901, S. 234.

dem zweiten Hauptsatze der Thermodynamik (Gibbs, v. Helmholtz): $E = W/23062 + T \cdot dE/dT$, worin E die EMK, W die Wärmetönung des stromliefernden Vorganges, T die absolute Temperatur bedeuten. Der Faktor $23062 = 0{,}239 \cdot 96494$ ist das Produkt aus Wärmeäquivalent der elektrischen Energie mal F. Wenn die Peltierwärme $T \cdot dE/dT$ gleich 0 wird, so wird die EMK allein durch die Wärmetönung bestimmt. Ist andererseits die Wärmetönung verschwindend klein (wie bei Konzentrationsketten), so hat man $E = T \cdot dE/dT$, d. h. die EMK ändert sich proportional der absoluten Temperatur.

(76) Berechnung elektromotorischer Kräfte II. Osmotische Theorie (Nernst)[1]). Unter Zugrundelegung der Gasgesetze für verdünnte Lösungen (van t'Hoff) gilt für die Potentialdifferenz eines Metalls gegen die Lösung eines seiner Salze: $E = (RT/nF) \times \ln C/c$ Volt, wo R die Gaskonstante ($= 8{,}316$ W × s), n die chemische Wertigkeit, C die Lösungstension des Metalls und c die Konzentration seiner Ionen in Grammäquivalent/Liter bedeuten (oder: $E = 1 \cdot 983 \cdot 10^{-4}$ $T/n \times \log C/c$; für 18°: $E = 0{,}0577/n \times \log C/c$. Für Metalloide und Anionen gilt die Formel mit negativem Vorzeichen.

Zwischen zwei verschieden konzentrierten Lösungen ($c_1 > c_2$) desselben Salzes besteht eine Potentialdifferenz (Nernst): $E = +(u-v)/(u+v) \times RT/nF \times \log c_1/c_2$, wo u und v die Beweglichkeiten des Kations bzw. des Anions bedeuten. Für eine Konzentrationskette mit zwei Elektroden gleichen Metalls (M) in verschieden konzentrierten Lösungen des gleichen Salzes (MS) nach dem Schema $M|MS$ verd.$|MS$ konz.$|M$ gilt:

$$E = RT/nF \times \left[\ln C/c_1 + \frac{u-v}{u+v} \ln c_1/c_2 - \ln C/c_2\right] = -RT/nF \times \frac{2v}{u+v} \ln \frac{c_1}{c_2}.$$

Der Sinn der EMK ist so gerichtet, daß der von ihr hervorgebrachte Strom die bestehenden Konzentrationsunterschiede auszugleichen strebt.

Bei einem galvanischen Element, das aus zwei verschiedenen Metallen mit den Tensionen C und C' und den Wertigkeiten n und n' besteht, die umgeben sind von Lösungen ihrer Salze mit den Konzentrationen c und c', gilt unter Vernachlässigung der geringfügigen Potentialdifferenz an der Berührungsstelle der beiden Lösungen der einfache Ausdruck:

$$E = RT/F \times (1/n \ln C/c - 1/n' \ln C'/c') = 1{,}98 \cdot 10^{-4}\, T(1/n \log C/c - 1/n' \log C'/c').$$

Diese Formeln gelten zur Berechnung sowohl elektromotorischer Kräfte von Elementen als der bei der Elektrolyse auftretenden Polarisationen (Zersetzungsspannungen). Die folgende Tabelle enthält für eine Reihe positiver und negativer chemischer Elemente die Elektrodenpotentiale (P) bzw. Zersetzungsspannungen

Elektrodenpotentiale P und Zersetzungsspannungen[2]) in äquivalentnormalen Lösungen der Ionen bei 18°.

Ion	P Volt	Ion	P Volt	Ion	P Volt
K	+ 3,2	Tl	+ 0,32	Ag	− 0,80
Na	+ 2,8	Co	+ 0,29	Hg	− 0,86
Mg	+ 1,55	Ni	+ 0,22	O_2	− 0,41
Mn	+ 1,0	Pb	+ 0,12	J	− 0,54
Zn	+ 0,76	Sn	+ 0,10	Br_2	− 1,08
Fe	+ 0,43	H_2	± 0,00	Cl_2	− 1,35
Cd	+ 0,40	Cu	− 0,34	F_2	− 1,9

[1]) Zeitschr. f. phys. Ch. 2, S. 613; 4, S. 129, (1889). — Wied. Ann., Bd. 40, S. 561, (1890).

[2]) Siehe: Abhandl. d. deutsch. Bunsen-Gesellsch. Nr. 5 „Messungen elektromotorischer Kräfte galv Ketten" von R. Abegg, Fr. Auerbach u. R. Luther; Halle 1911.

in äquivalentnormalen Lösungen ihrer Ionen entsprechend der Formel $P = 1{,}98 \cdot 10^{-4} T/n \times \log C/c$ für $c = 1$, wobei das Potential der Wasserstoffelektrode gleich 0 gesetzt ist. Für andere (c') als normale Konzentrationen ist $-0{,}058/n \times \log c'$ hinzuzufügen.

Literatur: W. Nernst, Theoretische Chemie, VII. Auflage, 1913. — S. Arrhenius, Lehrbuch der Elektrochemie, 1901. — Le Blanc, Lehrbuch der Elektrochemie, V. Auflage, 1911. — F. Förster, Elektrochemie wässeriger Lösungen, 1905. — Ferner: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 21 u. 23, W. Hittorf, Über die Wanderung der Ionen während der Elektrolyse; Nr. 86 u. 87, M. Faraday, Experimentaluntersuchungen über Elektrizität, III. bis VIII. Reihe, Elektrolyse, Nr. 124, H. v. Helmholtz, Abhandlungen zur Thermodynamik, Nr. 160, S. Arrhenius, Untersuchungen über die galvanische Leitfähigkeit der Elektrolyte Nr. 160.

c) Isolierstoffe.

(77) Flüssigkeiten. Die Leitfähigkeit flüssiger Isolierstoffe ist eine im wesentlichen elektrolytische, herrührend von Verunreinigungen, die in großer Verdünnung in ihnen gelöst sind. Beim Stromdurchgang werden diese mehr und mehr auf den Elektroden niedergeschlagen, wodurch sich der Widerstand erhöht. Diese „elektrische Reinigung" ist zuerst von H. Hertz am Benzin beobachtet worden (Ann. d. Phys. (3) Bd. 20, 1883, S. 283). Die Stromleitung in flüssigen Isolierstoffen ist von E. Warburg systematisch untersucht worden (Ann. d. Phys. (3) Bd. 54, 1895, S. 396; vgl. ferner die Beobachtungen von E. Jaffé am Hexan, Ann. d. Phys. (4) Bd. 28, 1909, S. 326).

(78) Feste Körper. Durchgangswiderstand. Man muß die festen Isolierstoffe in zwei wesentlich verschiedene Klassen scheiden, nämlich:

1. Körper, deren Leitfähigkeit im Stoff selbst liegt;
2. Körper, die ihre Leitfähigkeit in der Hauptsache aufgesogener Feuchtigkeit verdanken.

Zur ersten Klasse gehören Gummi, Guttapercha, Hartgummi, Porzellan, trockener Glimmer u. dgl. In die zweite Klasse sind alle Faserstoffe zu rechnen, insbesondere Papier, Baumwolle und ähnliches. Bei jenen ist der „Isolationswiderstand" (das Verhältnis der angelegten Spannung zum hindurchfließenden Strome) unter sonst gleichen Umständen von der Spannung unabhängig; dagegen nimmt er im Laufe der Zeit nach dem Anlegen der Spannung zu, weil sich über den eigentlichen, von der Zeit unabhängigen Leitungsstrom der Nachwirkungsstrom überlagert, der allmählich abnimmt (vgl. K. W. Wagner, Arch. f. Elektrot., Bd. 3, 1914, S. 67).

Bei den feuchtigkeitshaltigen Isolierstoffen mit Faserstruktur hängt der Isolationswiderstand nicht nur von der Menge der aufgenommenen Feuchtigkeit ab, sondern auch von ihrer Verteilung in den kapillaren Räumen in und zwischen den Fasern. Die Verteilung der Feuchtigkeit ändert sich unter der Einwirkung des elektrischen Feldes; es wird mehr Flüssigkeit in die Kapillaren hineingesogen, da die Oberflächenspannung abnimmt. Daher nimmt der Isolationswiderstand mit zunehmender Spannung E ab, und zwar angenähert nach der Formel

$$R \doteq \frac{\text{konst}}{\sqrt{E}}.$$

Da ferner die Verteilung der Feuchtigkeit in den Kapillaren den Feldänderungen nicht sogleich folgen kann, beobachtet man hier auch eine zeitliche Nachwirkung. (S. Evershed, Journ. of the Inst. of El. Eng., London, Bd. 52, 1913, S. 51; ETZ 1914, S. 887.)

Die Isolationswiderstände nehmen mit steigender Temperatur stark ab, und zwar angenähert nach dem Gesetze

$$R_t = R_0 e^{-\beta t},$$

β zwischen 0,07 und 0,1; t in Celsiusgraden.

Für einige Isolierstoffe sind die Zahlen zur angenäherten Umrechnung des Isolationswiderstandes auf andere Temperaturen den folgenden Tafeln zu entnehmen.

Umrechnung von Isolationswiderständen.

Ist R_t der Widerstand bei der Temperatur t, so ist er bei 15° C:

$$R_{15} = c \cdot R_t.$$

Guttapercha.

t	c	t	c	t	c	t	c
—4	0,081	4	0,233	12	0,672	20	1,94
—2	0,105	6	0,304	14	0,876	22	2,52
0	0,137	8	0,396	16	1,14	24	3,24
+2	0,179	10	0,516	18	1,44	26	4,29

Gummi, Papier, Faserstoff, Paraffin usw.

Die Umrechnungszahlen sind für anscheinend gleiche Stoffe sehr verschieden. Tritt die Notwendigkeit einer Umrechnung ein, so empfiehlt es sich, die liefernde Fabrik zu fragen. Zu Schätzungen können folgende Zahlen dienen:

	$t=$ 0	5	10	20	25
Gummi, Okonit, getrocknetes Papier	$c=$ 0,4	0,6	0,75,	1,4	2,0
Getränkter Faserstoff und Papier . .	0,4	0,5	0,6	2,5	7
Paraffin.	0,2	0,3	0,5	2,2	4,5

Die Höhe des Isolationswiderstandes hängt unter sonst gleichen Umständen von geringen Unterschieden in der Beschaffenheit und Zusammensetzung des Stoffes stark ab, so daß die Werte für verschiedene Proben desselben Stoffes oft im Verhältnis 1 : 10 bis 100 schwanken. Die folgenden Zahlen sind Mittelwerte von einer größeren Zahl von Proben nach Messungen von H. L. Curtis (Bull. of the Bur. of Standards, Washington 1915, Bd. 11, S. 359; ETZ 1916, S. 469).

Stoff	ϱ in Ohm·cm bei 20°	Stoff	ϱ in Ohm·cm bei 20°	Stoff	ϱ in Ohm·cm bei 20°
Ambroid	$5 \cdot 10^{16}$	Italien. Marmor . .	$1 \cdot 10^{11}$	Porzellan, unglasiert	$3 \cdot 10^{14}$
Bienenwachs, gelb	$20 \cdot 10^{14}$	Glimmer:		Quarz, geschmolzen	über $5 \cdot 10^{18}$
„ , weiß	$6 \cdot 10^{14}$	schwarzgefleckter		Kolophonium . . .	$5 \cdot 10^{16}$
Zelluloid, weiß . .	$2 \cdot 10^{10}$	afrikanischer . . .	$0{,}04 \cdot 10^{15}$	Siegellack	$8 \cdot 10^{15}$
Ceresin	über $5 \cdot 10^{18}$	hellbrauner afrik.	$2 \cdot 10^{15}$	Schellack	$1 \cdot 10^{16}$
Hartfiber	$20 \cdot 10^{9}$	farbloser afrik. . .	$200 \cdot 10^{15}$	Schiefer.	$1 \cdot 10^{8}$
Roter Fiber . . .	$5 \cdot 10^{9}$	rubinroter indi-		Schwefel	$1 \cdot 10^{17}$
Deutsches Glas .	$5 \cdot 10^{13}$	scher, stark ge-		Tetrachlornaphtha-	
Kavalierglas . . .	$800 \cdot 10^{13}$	fleckt	$0{,}05 \cdot 10^{15}$	lin	$5 \cdot 10^{13}$
Opalglas	$0{,}1 \cdot 10^{13}$	desgl., leicht ge-		Holz, paraffiniertes:	
Plattenglas. . . .	$2 \cdot 10^{13}$	fleckt	$50 \cdot 10^{15}$	Mahagoni	$4000 \cdot 10^{10}$
Glyptol[1])	$1 \cdot 10^{16}$	Mikanit	$1 \cdot 10^{15}$	Ahorn	$3 \cdot 10^{10}$
Hartgummi . . .	$1 \cdot 10^{18}$	Paraffin, rein . . .	über $500 \cdot 10^{16}$	Pappel	$50 \cdot 10^{10}$
Elfenbein.	$2 \cdot 10^{8}$	„ , technisch	$1 \cdot 10^{16}$		

(79) Oberflächenwiderstand. Neben der Stromleitung durch den Isolierstoff hindurch hat die Stromleitung über die Oberfläche hinweg praktische Bedeutung. Um ihren Einfluß mit zu berücksichtigen, wird nach den Prüfvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker für die gekürzte Untersuchung elektrischer Isolierstoffe (ETZ 1913, S. 688) der Oberflächenwiderstand gemessen. Darunter versteht man den Isolationswiderstand zwischen zwei geraden, 10 cm

[1]) Künstl. Harz, hergestellt von der General Electric Co.

langen Elektroden von vorgeschriebener Form, die einander parallel in 1 cm Abstand auf die 1 cm dicke Platte des Isolierstoffes gesetzt werden. Die Messung geschieht bei 1000 V Gleichspannung, und zwar

a) im Zustand der Einsendung, jedoch nach Abschleifen der Oberfläche,
b) nach 24stündiger Einwirkung von Wasser,
c) nach 3wöchiger Einwirkung von 25prozentiger Schwefelsäure,
d) nach 3wöchiger Einwirkung von Ammoniakdampf.

Zu jeder Versuchsreihe sind drei Platten zu verwenden; an jeder Platte sind mindestens zwei Messungen vorzunehmen. (Wegen weiterer Einzelheiten vgl. die genannte Veröffentlichung.)

Bei einer Änderung der Luftfeuchtigkeit von 25 auf 90% ändert sich der Oberflächenwiderstand der meisten Isolierstoffe um viele Zehnerpotenzen; die Luftfeuchtigkeit muß daher in jedem Falle mit angegeben werden. Bemerkenswert ist, daß diejenigen Stoffe, auf denen sich keine zusammenhängende Wasserhaut bilden kann, einen sehr hohen und von der Luftfeuchtigkeit nahezu unabhängigen Oberflächenwiderstand haben; z. B. Ceresin, Paraffin, Bienenwachs, Tetrachlornaphthalin, Siegellack und Kolophonium; nicht ganz so gut sind Schwefel, Bernstein und Zelluloid.

(80) Isolierwiderstand für Wechselstrom. Wegen des dielektrischen Energieverlustes (43) ist der mit Wechselstrom bestimmte Isolationswiderstand viel kleiner als der mit Gleichstrom gemessene. Bedeutet δ den in (43) definierten Winkel, f die Frequenz und C die Kapazität, so ist der zugehörige Isolationswiderstand

$$R = \frac{1}{2\pi f C \operatorname{tg} \delta}.$$

Da sich δ mit der Frequenz wenig ändert, so nimmt R mit zunehmender Frequenz ab.

d) Gase.

(81) Allgemeines. Selbständige und unselbständige Strömung. Den Strom in Gasen denkt man sich ähnlich wie in Elektrolyten durch Elementarladungen übertragen. Diese bewegen sich entweder für sich als freie Elektronen oder an Atome oder Atomgruppen gebunden als Ionen unter der Wirkung des elektrischen Feldes von einer Elektrode zur anderen. Näheres darüber besonders bei J. Stark, Die Elektrizität in Gasen. Leipzig 1902; J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen, 1903; deutsch von E. Marx. Leipzig 1906; Conduction of electricity through gases, 2d edition, Cambridge 1906; ferner nach dem neuesten Stande in dem Graetzschen Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Bd. 3, 1919 und in dem mehrbändigen Marxschen Handbuch der Radiologie.

Unter gewöhnlichen Verhältnissen ist die Zahl der freien Ladungen in einem Gase sehr gering; infolgedessen kommt unter der Wirkung eines schwachen elektrischen Feldes nur ein sehr geringer Strom zustande. Mit anderen Worten: das Gas verhält sich wie ein guter Isolator. Eine Erhöhung des Stromes kann nur durch eine Steigerung der freien Ladungen hervorgebracht werden. Sie ist auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen möglich:

a) dadurch, daß neutrale Gasmoleküle durch fremde Einflüsse (Röntgenstrahlen, Radiumstrahlen u. dgl.) in je ein positiv und ein negativ geladenes Teilchen (Ion) gespalten werden, oder dadurch, daß aus irgend einer Quelle elektrisch geladene Teilchen (Elektronen) in den Gasraum hineingeliefert werden, z. B. aus einem glühenden Metalldraht oder aus einer mit ultra-violettem Licht bestrahlten Metalloberfläche. Eine in dieser Weise hervorgebrachte elektrische Strömung heißt eine „unselbständige", weil sie nur so lange fortbesteht, als der ionenerzeugende oder ionenliefernde äußere Einfluß tätig ist.

Eine wichtige technische Anwendung einer unselbständigen Strömung ist die hochevakuierte (gasfreie) Elektronenröhre mit Glühdraht. Dieser

speit Elektronen in den Raum, der den Glühdraht umgibt. Befindet sich in der Röhre eine zweite Elektrode und legt man an diese den Pluspol einer Stromquelle, ihren Minuspol an den Glühdraht, so wandern die Elektronen nach jener Elektrode (der Anode), d. h. es fließt in der Röhre ein positiver Strom von der Anode zum Glühdraht. In der umgekehrten Richtung kann kein Strom durch die Röhre fließen, sie wirkt somit bei Wechselstrom als Gleichrichter (Fleming, Langmuir).

Durch die Anwendung der kinetischen Gastheorie auf Bewegung und Gleichgewicht der Elektronen an der Metalloberfläche hat Richardson die folgende Beziehung zwischen der Temperatur T des Glühdrahtes und dem von ihm ausgehenden Elektronenstrom i abgeleitet

$$i = a\sqrt{T}\,e^{-\frac{b}{T}},$$

a und b sind Konstanten, die vom Stoff und von den Abmessungen des Drahtes abhängen.

Diesen Strom i (den Sättigungsstrom) erhält man aber nur bei genügend hoher Spannung zwischen Glühdraht und Anode. Die von dem Glühdraht ausgespieenen Elektronen laden nämlich die Umgebung des Drahtes negativ und erzeugen ein Gegenfeld, das den Austritt weiterer Elektronen verhindert. Dieser von Langmuir und Schottky entdeckte Raumladeeffekt bewirkt, daß der Elektronenstrom bei kleineren Spannungen dem Gesetz

$$i = 14{,}65 \cdot 10^{-6}\,\frac{l}{r}\,\sqrt{E^3}$$

folgt, wobei E die angelegte Spannung, l die Länge, r der Radius einer den Glühdraht koaxial umgebenden zylindrischen Anode ist. Bei hoher Spannung zwischen Anode und Kathode erlangen die Elektronen große Geschwindigkeit und erzeugen beim Aufprallen auf die Gegenelektrode Röntgenstrahlen (Röntgenröhren nach Coolidge und Lilienfeld). Vgl. Marx, Handbuch der Radiologie Bd. V.

Bringt man in den Weg der Elektronen eine gitterartige dritte Elektrode, so kann man durch eine zwischen diese und den Glühdraht angelegte Spannung den Elektronenstrom beeinflussen. Hiervon macht man Gebrauch zur Verstärkung schwacher Ströme (Verstärkerröhre, von Lieben, Reiß, de Forest, Schottky, Rukop). Bei hoher Gitterspannung erlangen die Elektronen große Geschwindigkeit und lösen auf der Anode sekundäre Elektronen aus, deren Zahl in einem gewissen Bereich der Anodenspannung die Zahl der primären Elektronen übersteigt. Der Stromzweig Glühdraht-Anode wirkt dann wie ein negativer Widerstand (Dynatron von Hull).

Schaltet man in den Anodenkreis einer Röhre mit Hilfsgitter einen Schwingungskreis und läßt die in ihm entstehende Schwingung auf den Gitterkreis zurückwirken, so gewinnt man einen sich selbst erregenden Schwingungserzeuger (Schwingungsröhre, A. Meißner). Da der Elektronenstrom den Schwankungen der Gitterspannung praktisch trägheitslos folgt, kann man auf diesem Wege außerordentlich schnelle kontinuierliche Schwingungen erzeugen (bis 10^8 Per/s und mehr). Durch die Einführung der Schwingungsröhre hat die Hochfrequenztechnik eine vollständige Umwälzung erfahren.

In geeigneter Schaltung wirkt die Röhre mit Hilfsgitter zugleich als Gleichrichter und Verstärker und kann als Wellenempfänger (Detektor) benutzt werden (Audionschaltung nach de Forest; vgl. (942).

Literatur: H. Barkhausen, Die Vakuumröhre (erscheint demnächst). — Moeller, Die Elektronenröhre und ihre technischen Anwendungen. Braunschweig 1919 und zahlreiche Aufsätze im Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie, Bd. 14 und im Archiv für Elektrotechnik Bd. 8; z. B. W. Schottky, Über Hochvakuumverstärker, Arch. f. Elektr. Bd. 8, S. 1, 299. — H. Rukop, Die Hochvakuum-Eingitterröhre, Jahrb, d. drahtl. Tel. Bd. 14, S. 110. A. Meissner, Über Röhrensender, ETZ 1919, Heft 7 und 8.

b) Wenn die Stärke des elektrischen Feldes eine gewisse Größe übersteigt, so erlangen die vorhandenen Ionen in ihm eine so hohe Geschwindigkeit, daß sie befähigt werden, beim Aufprall auf neutrale Gasmoleküle diese in positive und negative Ionen zu spalten (Ionisierung durch Stoß; vgl. J. S. Townsend, Theory of ionization of gases by collision, 1910).

Der Strom wächst alsdann rasch, unter Umständen lawinenartig an. Diese Art der Strömung in Gasen nennt man eine „selbständige", weil sie ohne das Hinzutun äußerer Einflüsse fortbesteht. Je nach der Gasart, dem Gasdruck, der Temperatur, der Elektrodenform und den übrigen äußeren Bedingungen nimmt die selbständige Entladung sehr verschiedene Formen an; die wichtigsten sind die Glimmentladung und der Lichtbogen (Funken).

(82) Die Glimmentladung (Sprühen, Korona). Sie tritt in Luft von gewöhnlichem Druck immer dann auf, wenn das elektrische Feld sehr ungleichförmig ist und an gewissen Stellen große Werte erreicht, also namentlich an scharfen Kanten und Spitzen von Leitern und an dünnen Drähten. Die Feldstärke, bei der das Glimmen von Hochspannungsleitungen beginnt, ergibt sich nach Untersuchungen von Ryan, Watson, Whitehead, Peek, Petersen u. a. zu

$$\mathfrak{E}_0 = 29{,}7\left(1 + \frac{0{,}47}{\sqrt{d}}\right).$$

d = Drahtdurchmesser in cm. $\mathfrak{E}_0$ ist die Feldstärke (bei Wechselstrom der Höchstwert der Feldstärke) an der Drahtoberfläche in kV/cm. Die zugehörige Betriebsspannung (bei Wechselstrom die effektive Betriebsspannung zwischen den Leitern), die sogenannte Anfangsspannung ist

$$\mathfrak{E}_0 = A\,\mathfrak{E}_0 d \ln\frac{2a}{d}.$$

A = 1 für Gleichstrom,
= 0,707 für sinusförmigen Wechselstrom,
= 0,611 für sinusförmigen Dreiphasenstrom,
a = Abstand der Drähte in cm.

Die vorstehende Formel gilt für saubere Drähte mit glatter Oberfläche. Durch kleine Unregelmäßigkeiten der Oberfläche, Kratzer, Beulen, Häkchen, ferner auch durch Nässe, Regen, Nebel, Schnee und Eisbildung wird die Anfangsspannung herabgesetzt. Auch bei Drahtseilen und Litzen ist die Anfangsspannung niedriger als beim massiven Draht. Man kann diese Einflüsse zum Teil durch Hinzufügung eines „Unregelmäßigkeitsfaktors" m_0 auf der rechten Seite der vorstehenden Formel berücksichtigen, wobei für polierte Drähte $m_0 = 1$, für gewöhnliche Drähte $m_0 = 0{,}98$ bis 0,95, für siebendrähtige Seile $m_0 = 0{,}87$ bis 0,83 zu setzen ist.

(83) Glimmverluste. Durch das Glimmen der Leitungen entstehen Energieverluste, die beim Einsetzen des Glimmens gering sind, aber mit zunehmender Spannung rasch anwachsen. Peek gibt die folgende Formel zur Berechnung der Glimmverluste an Leitungen für hochgespannten Wechsel- oder Drehstrom:

$$N = 344\,\frac{1}{\delta} f \sqrt{\frac{d}{2a}}\left[\frac{E - \delta E_0}{2}\right]^2 10^{-5}.$$

N in kW für 1 km einfacher Leitungslänge. E ist die effektive Spannung zwischen den Leitern in kV; bei Drehstrom ist für $(E - \delta E_0)/2$ zu setzen $(E - \delta E_0)/\sqrt{3}$. f ist die Frequenz, d der Drahtdurchmesser in cm, a der Drahtabstand in cm, $\delta = \frac{3{,}92\,b}{273 + t}$, worin b der Barometerstand in cm, t die Temperatur ist.

Nach Versuchen von Weidig und Jaensch (ETZ 1913, S. 637) hat die Form der Spannungskurve, vor allem in der Nähe des Scheitelwertes, großen Einfluß auf die Höhe der Verluste. Ferner ergab sich, daß die Verluste zwar linear

aber nicht proportional mit der Frequenz wachsen. Die gemessenen Verluste weichen namentlich bei Spannungen, die wenig über der Anfangsspannung liegen, wesentlich von den nach der Peekschen Formel berechneten ab. Diese Formel erlaubt daher nur eine sehr rohe Vorausberechnung der Glimmverluste.

(84) Die Glimmentladung in verdünnten Gasen. In verdünnten Gasen von nicht allzu niedrigem Druck geschieht der Stromübergang gewöhnlich in Form der Glimmentladung. Dabei gerät das Gas in ein mildes Leuchten, dessen Farbe von der Gasart abhängt. Diese Erscheinung wird beim Moorelicht und in der Glimmlampe von Pintsch (mit Neonfüllung) technisch angewandt. Unter geeigneten Bedingungen bedeckt sich die Kathode mit einer Lichthaut, deren Ausdehnung der Stromstärke proportional ist. Hiervon wird beim Glimmlicht-Oszillograph nach Gehrcke Gebrauch gemacht.

Eine Glimmlichtröhre vermag unter bestimmten Bedingungen in einem ihr parallel geschalteten Schwingungskreise dauernde elektrische Schwingungen zu erregen (Gehrcke, Reichenheim u. Wertheimer, DRP. 270610, 273534 u. 295761. Literatur über die Glimmentladung in den Artikeln von Gehrcke und Seeliger in Marx' Handbuch der Radiologie, Bd. 3.

(85) Der Lichtbogen. Tritt in der Gasstrecke auf dem ganzen Weg zwischen den Elektroden eine so starke Ionisierung auf, daß die Kathode durch den Aufprall der positiven Ionen bis zur Weißglut erhitzt wird, so nimmt die Entladung die Form des Lichtbogens oder Funkens an. In Luft von gewöhnlichem Druck geschieht das, wenn das Feld zwischen den Elektroden einigermaßen gleichförmig ist, und wenn der innere Widerstand der Stromquelle nicht allzu hoch ist, sogleich beim Einsetzen der Ionisierung durch Stoß, indem sich die Ionenlawine über die ganze Entladungsstrecke ausbreitet; die Anfangsspannung ist alsdann identisch mit der Funkenspannung (Überschlagspannung). Auch die Glimmentladung geht bei hinreichender Spannungssteigerung in den Lichtbogen über.

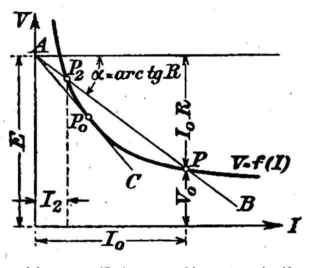


Abb. 24. Fallende Charakteristik des Lichtbogens.

Für den Lichtbogen versagt, ebenso wie für die übrigen Formen der Strömung in Gasen, das Ohmsche Gesetz vollständig.

Man ist darauf angewiesen, die Strom-Spannungs-Charakteristik $[V = f(I)]$ für die betreffende Entladungsform experimentell festzustellen. Die Charakteristik des Gleichstromlichtbogens ist nach Ayrton („The electric arc") von der Form:

$$V = a + \frac{b}{I}.$$

Den Strom I_0, den ein Lichtbogen mit einem Vorschaltwiderstande R einer Spannungsquelle E entnimmt, bestimmt man bei gegebener Charakteristik graphisch (Abb. 24). Man trägt auf der Spannungsachse die Strecke E ab und zieht in ihrem Endpunkt A die Widerstandslinie AB mit dem Neigungswinkel $\alpha = \operatorname{arctg} R$. Sie schneidet die Charakteristik im Punkte P, der den Strom I_0 bestimmt. Die Richtigkeit der Konstruktion ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetze (angewandt auf den Stromkreis außerhalb der Lichtbogenstrecke):

$$E = V_0 + R I_0.$$

Es gibt noch einen zweiten Schnittpunkt P_2, der einen kleineren Strom I_2 ergeben würde. In diesem Punkte ist aber der Zustand des Stromkreises nicht stabil. Denn wenn es auch gelänge, den Strom I_2 in dem gegebenen Stromkreise auf irgendeine Weise einmal herzustellen, so würde doch, wie sich zeigen läßt, die geringste zufällige Abnahme des Stromes I_2 sich bis zum Er-

löschen des Bogens steigern; und umgekehrt müßte nach der geringsten zufälligen Zunahme der Strom bis auf den Wert I_0 anwachsen. (W. Kaufmann, Ann. d. Phys. (4) Bd. 2, S. 158, 1900.) Ein Punkt, in dem die Widerstandslinie die Charakteristik von oben schneidet, bestimmt einen stabilen Zustand.

Wenn man R steigert, so verläuft die Widerstandslinie immer steiler; in der Grenzlage $A\,C$ erlischt der Bogen.

Der Stabilität wegen kann ein Lichtbogen nur mit Vorschaltwiderstand brennen; auch der Nernstbrenner muß einen solchen erhalten, damit er bei einer zufälligen Spannungssteigerung nicht durchbrennt. (H. Th. Simon, ETZ 1905, S. 819, Abb. 20.)

Für schnell veränderliche Zustände (Wechselstromvorgänge) treten an Stelle der statischen sogenannte dynamische Charakteristiken, die sich für den Lichtbogen in vielen Fällen nach der Theorie von H. Th. Simon[1]) vorausberechnen lassen.

Der Funken ist nichts weiter als ein kurz dauernder Lichtbogen.

In einem ihm parallel geschalteten Schwingungskreise vermag der Lichtbogen dauernde elektrische Schwingungen zu erregen (Duddell, Poulsen, Simon, Rein; näheres siehe (931)).

Eine eingehende Bearbeitung der Lichtbogenerscheinungen findet man bei Hagenbach in Marx' Handbuch der Radiologie, Bd. 4.

Das magnetische Feld elektrischer Ströme.

(86) Grundlegende Beziehungen. Magnetomotorische Kraft. Im Felde permanenter Magnete verschwindet das Linienintegral der magnetischen Feldstärke, die magnetomotorische Kraft (MMK), längs jeder geschlossenen Kurve:

$$\oint \mathfrak{H}\, ds = 0, \quad \text{oder} \quad \text{rot}\, \mathfrak{H} = 0.$$

$\mathfrak{H}$ kann daher als Gefälle eines einwertigen Potentials ψ dargestellt werden: $\mathfrak{H} = -\,\text{grad}\, \psi$.

Ein magnetisches Feld ist auch mit jeder elektrischen Strömung verbunden. Wenn der Strom in leitend geschlossenen Bahnen fließt (Gleichstrom, langsamer — quasistationärer — Wechselstrom), so befinden sich die Wirbel des magnetischen Feldes nur innerhalb der Stromleiter.

Es gilt

$$\textbf{rot}\, \mathfrak{H} = 4\pi\mathfrak{i}$$

$\mathfrak{i}$ = Stromdichte. Daraus folgt, daß längs jedes geschlossenen Weges l die MMK gleich dem 4π-fachen Stromfluß durch irgendeine von dem Wege berandete Fläche F ist:

$$\oint_l \mathfrak{H}\, ds = 4\pi \int_F \mathfrak{i}_\mathfrak{n}\, df.$$

df ist ein Flächenelement von F, $\mathfrak{i}_\mathfrak{n}$ die zu df normale Komponente der Stromdichte. Dabei muß die Randlinie l im Uhrzeigersinne umlaufen werden, wenn man in Richtung der Normalen $\mathfrak{n}$ blickt (oder: l und $\mathfrak{n}$ verhalten sich wie Drehungs- und Fortschreitungssinn einer Rechtsschraube)[2]). Für alle Umläufe, bei denen kein durchströmter Leiter durchschnitten oder umkreist wird, wird hiernach die MMK Null. In stromlosen Räumen kann man also wie im Felde permanenter

[1]) Phys. Zeitschr. Bd. 6, S. 297, 1905; ETZ 1905, S. 818, 839. Siehe auch K. W. Wagner, Der Lichtbogen als Wechselstromerzeuger. Leipzig 1910 (S. Hirzel).

[2]) Diese Richtungsbestimmung entspricht den Ampereschen Regeln der älteren Elektrodynamik.

Magnete (29) $\mathfrak{H} = -\operatorname{grad}\psi$ setzen. Jedoch ist nun das Potential nur dann noch einwertig, wenn in dem stromlosen Raum Wege, die mit dem Stromleiter verschlungen sind, unmöglich sind oder durch passend angebrachte Sperrflächen unmöglich gemacht werden. An diesen Sperrflächen erleidet das Potential einen Sprung.

(87) Das Vektorpotential. In Räumen, in denen die Permeabilität μ räumlich konstant ist, kann $\mathfrak{H}$ von einem Vektorpotential $\mathfrak{A}$ abgeleitet werden:

$$\mathfrak{H} = \operatorname{rot}\mathfrak{A}; \qquad \mathfrak{A} = \int \frac{\mathfrak{i}\, dv}{r},$$

$\mathfrak{i}$ = Stromdichte im Raumteil dv, r dessen Abstand von dem Punkt, in dem das Vektorpotential gesucht ist.

(88) Lineare Leiter. Ist I der Strom, $d\mathfrak{s}$ ein Linienelement des Leiters, so wird ($\operatorname{grad}\mu = 0$)

$$\mathfrak{A} = I\int \frac{d\mathfrak{s}}{r}; \quad \mathfrak{H} = \operatorname{rot}\mathfrak{A} = I\int \frac{[d\mathfrak{s}\,\mathfrak{r}]}{r^3}$$

(Biot-Savarts Gesetz). Man drückt das oft so aus: Jedes Stromelement $I\,d\mathfrak{s}$ liefert zur Feldstärke einen Beitrag $|d\mathfrak{H}| = \frac{I\,ds\,\sin(ds, r)}{r^2}$; doch hat dieser Satz nur für geschlossene Strombahnen und konstantes μ einen Sinn. Dagegen ist die Grundgleichung

$$\oint \mathfrak{H}\, d\mathfrak{s} = 4\pi\Sigma I$$

auch für veränderliches μ richtig. ΣI ist der mit dem Integrationsweg für $\mathfrak{H}$ verkettete Gesamtstrom (die Durchflutung) in absolutem Maß (d. h. in Dekaampere).

(89) Beispiele.

1. Geschlossenes Ringsolenoid mit m gleichmäßig eng gewickelten Windungen. Ein merkliches Feld ist nur im Ringinnern vorhanden. Die Kraftlinien verlaufen in konzentrischen Kreisen um die Ringachse. Für den Kreis vom Radius r wird

$$\oint \mathfrak{H}\, ds = 2\pi r\mathfrak{H} = \mathfrak{H}l = 4\pi m I, \quad I \text{ in CGS},$$

$$\text{daraus } \mathfrak{H} = 0{,}4\pi m\, I/l, \quad I \text{ in Ampere.}$$

2. Langes geradliniges Solenoid, Länge l groß gegen den Durchmesser. Das Feld ist im Innern praktisch homogen von der Stärke[1])

$$\mathfrak{H} = 0{,}4\pi m\, I/l, \quad I \text{ in Ampere.}$$

(Ein streng homogenes Feld entsteht im Innern eines gleichmäßig bewickelten Ellipsoids.)

3. Kreisstrom (Tangentenbussole) vom Radius r; die Feldstärke in einem Punkt der Achse mit dem Abstand x von der Kreisebene wird

$$\mathfrak{H} = \frac{\pi r^2 m I}{5\sqrt{(x^2 + r^2)^3}}, \quad I \text{ in Ampere.}$$

4. Langer gerader Draht. In der Nähe des Drahtes sind die Kraftlinien Kreise um die Drahtachse; im Abstand r von der Achse wird

$$\mathfrak{H} = 2I/r, \; I \text{ in CGS}, \; = I/5r, \; I \text{ in Ampere.}$$

---

[1]) Genaue Formeln bei P. Debye, Bd. V, Art. 17, § 22 (S. 437) der Enzyklopädie der Math. Wiss. Leipzig 1910.

Das gilt für Punkte außerhalb des stromerfüllten Drahtes; im Innern ist, wenn der Strom gleichmäßig auf den Querschnitt verteilt ist,

$$\mathfrak{H} = \frac{2Ir}{a^2},\ I \text{ in CGS},\ = \frac{Ir}{5a^2},\ I \text{ in Ampere}.$$

a = Drahtradius in cm.

(90) Angenäherte Berechnung der MMK. In Dynamomaschinen, Transformatoren und anderen Apparaten mit einem nahezu geschlossenen Eisenweg kann man, abgesehen von der Streuung, den Verlauf der Induktionslinien ($\mathfrak{B}$) und bei gegebenem Induktionsfluß $\Phi = \int \mathfrak{B}_n\, df$ auch die Stärke der Induktion $\mathfrak{B}$ in jedem Querschnitt q annähernd bestimmen: $\mathfrak{B} = \Phi/q$. Hieraus folgt die Feldstärke $\mathfrak{H} = \Phi/\mu q$. Setzt sich der magnetische Kreis aus angenähert zylindrischen Teilen von den Längen $l_1, l_2, \ldots$ und den Querschnitten $q_1, q_2, \ldots$ zusammen, so wird

$$\oint \mathfrak{H}\, ds = \sum_n \mathfrak{H}_n l_n = \Phi \sum_n \frac{l_n}{\mu_n q_n}.$$

I. W.: Die MMK ist gleich dem Induktionsfluß Φ (Magnetstrom), multipliziert mit der Summe der magnetischen Widerstände $l_n/\mu_n q_n$ der einzelnen Teile des Kreises (sogenanntes Ohmsches Gesetz für den magnetischen Kreis). Aus der MMK kann man nach (88) die Zahl der Amperewindungen $\sum I$ berechnen, die mit dem Kreis verkettet sein müssen, damit das berechnete magnetische Feld zustande kommt. Vgl. (304, 310.)

(91) Die magnetische Energie. Der allgemeine Ausdruck für die in einem elektromagnetischen Felde enthaltene magnetische Energie

$$W_m = \frac{1}{8\pi}\int \mathfrak{B}\,\mathfrak{H}\, dv = \frac{1}{8\pi}\int \mu \mathfrak{H}^2\, dv = {}^1/_2 \int \mathfrak{A}\,\mathfrak{i}\, dv$$

geht für das Feld linearer Stromschleifen ($I_1, I_2, I_3 \ldots$) über in

$$W_m = {}^1/_2 L_1 I_1^2 + {}^1/_2 L_2 I_2^2 + {}^1/_2 L_3 I_3^2 + \cdots + M_{12} I_1 I_2 + M_{13} I_1 I_3 + M_{23} I_2 I_3 + \cdots,$$

$L_1, L_2, L_3, \ldots$ heißen die Selbstinduktivitäten der Schleifen $1, 2, 3, \ldots$; M_{12} ist die Gegeninduktivität der Schleifen 1 und 2; M_{13} diejenige der Schleifen 1 und 3; und so fort.

Die magnetische Energie zweier miteinander verketteter linearer Stromschleifen

$$W_m = {}^1/_2 L_1 I_1^2 + M I_1 I_2 + {}^1/_2 L_2 I_2^2$$

läßt sich auch in der Form schreiben

$$W_m = {}^1/_2 L_1 I_{1\mu}^2 + {}^1/_2 L_2 \sigma I_2^2 \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

Darin bedeutet

$$I_{1\mu} = I_1 + \frac{M}{L_1} I_2 \quad \ldots \ldots \quad (2)$$

den auf die Schleife 1 bezogenen „Magnetisierungsstrom",

$$\sigma = 1 - M^2/L_1 L_2$$

die „Streuziffer". $L_1 I_{1\mu} = L_1 I_1 + M I_2$ ist der auf die Schleife 1 bezogene Hauptfluß, $L_2 \sigma I_2$ ist der zugehörige Streufluß. Der erste Summand auf der rechten Seite von Gl. (1) ist die Energie des magnetischen Hauptfeldes, der zweite Summand ist die Energie des magnetischen Streufeldes.

Bei gewöhnlichen Transformatoren und Induktionsmotoren ist die Streuung σ klein; der Magnetisierungsstrom ist viel kleiner als die Belastungsströme I_1 und

$I_2 M/L_1$. Dann ist also nach Gl. (2) angenähert $I_1 \approx -M I_2/L_1$ und die Energie des Streufeldes $^1/_2 L_2 \sigma I_2^2 \approx {}^1/_2 L_1 \sigma I_1^2$.

(92) Selbstinduktivitäten[1].

1. Einfacher Drahtkreis vom Radius R und dem Drahtradius r. Sehr angenähert ist (Rayleigh und Niven, Rayleighs Collected Papers, Bd. 2, S. 15):

$$L \approx 4\pi R \left[\left\{1 + \frac{r^2}{8R^2}\right\} \log \text{nat} \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} + \frac{r^2}{24R^2} \right].$$

2. Kurze einlagige Spule von der Länge l (einschließlich der Isolation der ersten und der letzten Windung) und dem Radius R, die m Windungen hat. Nach Rayleigh und Niven (Proc. Roy. Soc. Bd. 32, S. 104, 1881) ist sehr angenähert

$$L \approx 4\pi R m^2 \left\{\log \text{nat} \frac{8R}{l} - \frac{1}{2} + \frac{l^2}{32R^2}\left(\log \text{nat} \frac{8R}{l} + \frac{1}{4}\right)\right\}.$$

Genauere Formeln bei Glage, Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph. Bd. 2, S. 503, 1909.

3. Lange Spule von der Länge l und dem Radius R, welche eine Lage von m Windungen hat (Webster u. Havelock):

$$L = 4\pi^2 m^2 \frac{R^2}{l}\left(1 - \frac{8}{3\pi}\frac{R}{l} + \frac{1}{2}\frac{R^2}{l^2} - \frac{1}{4}\frac{R^4}{l^4} + \frac{5}{16}\frac{R^6}{l^6} - \frac{35}{64}\frac{R^8}{l^8}\cdots\right).$$

Den Wert K des Klammerausdrucks hat Nagaoka für die Werte von $2R/l = 0{,}01$ bis 10 berechnet. Die ausführliche Tafel ist in dem in der Fußnote genannten Aufsatz von Rosa u. Grover auf S. 224 ff. abgedruckt; wir geben hier nur einen Auszug, und zwar gleich die Werte von $k = 4\pi^2 RK/l$, so daß die Formel in der Gestalt erscheint.

$$L = k R m^2$$

$\frac{2R}{l}$	k	$\frac{2R}{l}$	k	$\frac{2R}{l}$	k	$\frac{2R}{l}$	k
0,05	0,9663	0,55	8,719	1,10	14,49	2,60	23,74
0,10	1,893	0,60	9,339	1,20	15,34	2,80	24,60
0,15	2,781	0,65	9,937	1,30	16,14	3,00	25,42
0,20	3,632	0,70	10,514	1,40	16,90	3,20	26,18
0,25	4,449	0,75	11,070	1,50	17,62	3,40	26,90
0,30	5,234	0,80	11,608	1,60	18,30	3,60	27,59
0,35	5,987	0,85	12,128	1,80	19,58	3,80	28,24
0,40	6,710	0,90	12,631	2,00	20,75	4,00	28,85
0,45	7,406	0,95	13,117	2,20	21,82	4,50	30,28
0,50	8,075	1,00	13,589	2,40	22,81	5,00	31,57

Für sehr genaue Berechnungen ist an den Formeln unter 2 und 3 wegen des nicht vom Strom erfüllten Raumes zwischen benachbarten Drähten eine Korrektion anzubringen, die in den Aufsätzen von Rosa und Grover (S. 122, 197—199) und von Glage (S. 506) angegeben ist.

Die Formeln unter 2 und 3 gelten angenähert auch für mehrlagige Spulen, wenn unter n die gesamte Windungszahl, unter R der mittlere Spulenradius verstanden wird. Für genaue Berechnungen muß man eine Korrektion wegen

[1]) Siehe auch P. Debye, Bd. V, Art. 17, § 32, S. 464 der Enzyklopädie der Math. Wiss., Leipzig 1910. — E. Orlich, Kapazität und Induktivität, S. 63—92. Braunschweig 1909. — G. Glage, Jahrb. der drahtl. Telegr. und Telephonie Bd. 2, S. 501, 593. — E. B. Rosa und F. W. Grover, Bull. Bureau of Standards, Vol. 8, Nr. 1, Washington 1911. (Kritische Zusammenstellung von Formeln und Zahlentafeln.)

der endlichen (radialen) Dicke der Wicklung anbringen, die bei Rosa und Grover auf S. 138 und 200, bei Glage auf S. 510 angegeben ist.

4. Kurze flache Spule (Weinstein, Ann. d. Phys. (3) Bd. 21, 1884, S. 329); Wicklungsquerschnitt ein Quadrat von der Seite s, mittlerer Radius der Spule R, äußerer und innerer Radius $R+s/2$ und $R-s/2$, Windungszahl m

$$L=4\pi R m^2 \left[\left(1+\frac{s^2}{24 R^2}\right) \log \text{nat} \frac{8R}{s} - 1{,}195 + 0{,}03657 \frac{s^2}{R^2}\right].$$

Ein Minimum des Widerstandes erhält man für $R=1{,}85 s$; führt man diesen Wert ein, so folgt, wenn auf eine Lage von 1 cm Länge K Windungen gehen

$$L=19{,}4\, R m^2 = \frac{35{,}9}{K} m^{5/2}.$$

Diese Formeln gelten für einen Draht von Quadratquerschnitt. Für Drähte mit Kreisquerschnitt ist zu dem L ein Korrektionsglied ΔL zu addieren:

$$\Delta L = 4\pi R m \left(\log \text{nat} \frac{d}{r} + 0{,}155\right).$$

d = Drahtabstand, r = Drahtradius. Die Konstante 0,155 hängt, genau genommen, etwas von der Windungszahl ab; sie steigt von 0,144 bei 2 Windungen auf 0,156 bei unendlich vielen Windungen (Rosa u. Grover, S. 140).

5. Flachspule (Kreisring), mit m Windungen, äußerer Radius R, innerer Radius r, Höhe vernachlässigbar (J. Spielrein, Arch. Elektr. Bd. 3, 1915, S. 187)

$$L = k R m^2,$$

k ist der folgenden Tafel zu entnehmen:

$\frac{r}{R}$	k	$\frac{r}{R}$	k	$\frac{r}{R}$	k
0	6,970	0,45	17,23	0,88	42,99
0,05	7,716	0,50	18,97	0,90	45,74
0,10	8,556	0,55	20,89	0,91	47,31
0,15	9,488	0,60	23,01	0,92	49,04
0,20	10,51	0,65	25,39	0,93	50,97
0,25	11,63	0,70	28,09	0,94	53,18
0,30	12,86	0,75	31,21	0,95	55,75
0,35	14,19	0,80	34,92	0,99	77,65
0,40	15,65	0,85	39,53	1,00	∞

6. Zur Berechnung der Induktivität zylindrischer Spulen mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt, mit etwa ±3% Genauigkeit sind die von Korndörfer (ETZ 1917, S. 521) angegebenen Formeln $L=10{,}5\, m^2 D (D/U)^k$ sehr bequem. D = mittlerer Spulendurchmesser, U = Umfang des Wicklungsquerschnitts. $k=3/4$, wenn $0<D/U<1$; $k=1/2$, wenn $1<D/U<3$.

7. Formeln und Zahlentafeln zur Berechnung der Selbstinduktivität von Zylinderspulen und von Flachspulen mit rechteckigen Windungen hat A. Esau angegeben (Jahrb. d. drahtl. Tel. Bd. 14, 1919, S. 271 und 386).

8. Rechteckige Spule mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt; a und b Seiten des Rechtecks, α und β Höhe und Breite des Wicklungsquerschnitts. Nach Sumec (ETZ 1906, S. 1175) ist angenähert

$$L \approx 9{,}2\, m^2 \left\{a \log \text{vulg} \frac{b}{(\alpha+\beta)_a} + b \log \text{vulg} \frac{a}{(\alpha+\beta)_b} + 3(a+b)\right\}.$$

Voraussetzung: Der Wicklungsraum wird vom Stromleiter vollkommen erfüllt,

9. Spulen hoher Selbstinduktivität werden durch Verwendung von Eisenkernen erhalten; bei ihnen hängt L (wegen der Veränderlichkeit von μ) von der Stromstärke ab.

10. Einfachleitung, Rückleitung durch die Erde; Drahtradius r, Länge l

$$L = 2l\left(\log\operatorname{nat}\frac{2l}{r} - \alpha\right).$$

$\alpha = 3/4$ bis $7/4$ je nach der Verteilung der Rückströme im Erdboden (nach F. Breisig, Theoret. Telegraphie, § 120, S. 168; Braunschweig 1910).

11. Doppelleitung; Länge l.

a) Zwei Drähte vom Radius r_1 bzw. r_2 im Abstand d

$$L = l(4 \log\operatorname{nat} d/\sqrt{r_1 r_2} + \alpha),$$

$\alpha = 1$, wenn der Strom den Drahtquerschnitt gleichmäßig erfüllt (niedere Frequenz). $\alpha = 0$, wenn der Strom merklich auf eine dünne Oberflächenschicht beschränkt ist (hohe Frequenz).

b) Leiter vom beliebigen Querschnitt F_1 bzw. F_2.

$$L = 2l \log\operatorname{nat} g_{12}^2/g_{11}\, g_{22}$$

g_{12} = mittlerer geometr. Abstand[1]) der Fläche F_1 von F_2;
g_{11} = ,, ,, ,, ,, F_1 von sich selbst;
g_{22} = ,, ,, ,, ,, F_2 von sich selbst.

$$\log\operatorname{nat} g_{12} = \frac{1}{F_1 F_2}\int\limits_{F_1}\int\limits_{F_2} dF_1\, dF_2 \log\operatorname{nat} Z.$$

Z = Abstand der Flächenelemente dF_1 und dF_2. (Näheres bei E. Orlich, ETZ 1908, S. 310.)

In sämtlichen Formeln sind die Längen in cm einzusetzen; L wird in absolutem Maß (cm) erhalten; 1 Henry = 10^9 cm.

(93) Gegeninduktivitäten.

1. Zwei gleich lange einfache Drahtlagen, die mit den Windungszahlen K_1 und K_2 für 1 cm auf denselben Zylinder gewickelt sind, und die die Fläche S umschließen:

$$M = 4\pi K_1 K_2 l S.$$

2. Zwei Kreisdrähte von den Radien R und r in parallelen Ebenen, deren Abstand x zugleich der Mittelpunktsabstand der beiden Kreise ist. Sehr angenähert ist[2])

$$M = 4\pi\sqrt{Rr}\left[A \log\operatorname{nat}\frac{8}{\sqrt{p}} - B\right],$$

wobei

$$p = \frac{x^2 + (R-r)^2}{Rr},$$

$$A = 1 + \frac{3}{16}p - \frac{15}{1024}p^2 + \cdots, \quad B = 2 + \frac{1}{16}p - \frac{31}{2048}p^2 + \cdots$$

ist (Havelock, Phil. Mag. Bd. 15, 1908, S. 332).

3. Schleifen aus parallelen geraden Drähten von der Länge l. Besteht die eine Schleife aus den Drähten 1 und 2, die andere aus den Drähten 3 und 4, von denen

[1]) Maxwell, Elektrizität und Magnetismus Bd. 2, Art. 691, 692, deutsche Ausgabe 1883.

[2]) Die genaue Formel nebst Tafeln zur Berechnung findet man in den „Funktionentafeln" von E. Jahnke und F. Emde, S. 76, Leipzig 1909. Siehe auch Rosa und Grover, Bull. of the Bur. of Standards, Washington 1911, Bd. 8, S. 6.

1 und 3 als Hinleitung dienen, und bezeichnen r_{12}, r_{13} usw. die entsprechenden Drahtachsenabstände, so ist

$$M = 2l \log \text{nat}\,(r_{23} r_{14}/r_{13} r_{24}).$$

4. Schleifen mit gemeinsamer Rückleitung (Drehstromleitung). Bezeichnet man die Drähte wie im vorigen Beispiel, und fallen 2 und 4 zusammen, so gilt

$$M = 2l\left(\log \text{nat}\frac{r_{12} r_{23}}{r_{13} r} + \frac{1}{4}\right),$$

r = Drahtradius der gemeinsamen Rückleitung.

5. Zwei Einfachleitungen mit Erde als Rückleitung — Telegraphenkabel. (F. Breisig, Theoret. Telegraphie, § 117 bis 119; Braunschweig 1910.) l = Länge, d = Abstand der Leiter

$$M = 2l\left(\log \text{nat}\frac{2l}{d} - \alpha\right),$$

$\alpha = 1$ bis 2 je nach dem Verlauf der Ströme in der Erde.

Längen in cm; M in cm; 1 Henry $= 10^9$ cm.

(94) Rasch veränderliche Felder. Verschiebungsstrom. Dort, wo Stromlinien einmünden, nehmen die Ladungen entsprechend zu: $-\operatorname{div} \mathfrak{i} = \partial\eta/\partial t$. Weil nun von jeder Ladungseinheit eine Verschiebungslinie ausgeht ($\eta = \operatorname{div} \mathfrak{D}$; also $-\operatorname{div} \mathfrak{i} = \operatorname{div} \partial\mathfrak{D}/\partial t$), so entspricht jeder einmündenden Stromlinie ein Wachstum des Verschiebungsflusses um eine Linie in der Sekunde. Die Zunahme des Verschiebungsflusses in der Sekunde wird Verschiebungsstrom genannt. Zu jeder irgendwo einmündenden Stromlinie gehört also eine von ebendort ausgehende Verschiebungsstromlinie. Durch die Zusammensetzung des Leitungsstroms $\mathfrak{i}$ und des Verschiebungsstromes $\partial\mathfrak{D}/\partial t$ entsteht somit ein wahrer Strom $\mathfrak{c}$

$$\mathfrak{c} = \mathfrak{i} + \frac{\partial\mathfrak{D}}{\partial t}$$

dessen Linien nirgends Anfangs- und Endpunkte haben ($\operatorname{div} \mathfrak{c} = 0$). Nach Maxwell erzeugt ein Verschiebungsstrom genau dasselbe Magnetfeld wie ein ebenso verteilter Leitungsstrom, und es gilt ganz allgemein (in allen Körpern und für beliebig rasche Änderungen)

$$\operatorname{rot} \mathfrak{H} = 4\pi\mathfrak{c} = 4\pi(\mathfrak{i} + \partial\mathfrak{D}/\partial t).$$

Für Gleichstrom geht dies in die frühere Gleichung $\operatorname{rot} \mathfrak{H} = 4\pi\mathfrak{i}$ (86) über; auch bei langsamem — quasistationärem — Wechselstrom kann man die magnetischen Wirkungen des Verschiebungsstromes im allgemeinen vernachlässigen; im Innern von Metallen ist der Verschiebungsstrom stets unmeßbar klein.

Das Induktionsgesetz.

(95) Das Grundgesetz von Faraday-Maxwell. Denkt man sich eine beliebige Fläche F mit der Randlinie l, so ist das Linienintegral der elektrischen Feldstärke — die induzierte EMK E_i — längs l gleich der Abnahme, die der über die Fläche F berechnete Induktionsfluß $\Phi = \int_F \mathfrak{B}_n\, df$ in der Sekunde erfährt:

$$E_i = \oint_l \mathfrak{E}\, d\mathfrak{s} = -\frac{d}{dt}\int_F \mathfrak{B}_n\, df = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Dabei soll durch die Flächennormale n und den Umlaufssinn von l der Fortschreitungs- und Drehsinn einer Rechtsschraube bestimmt werden. Außer-

dem soll bei bewegten Körpern die Randlinie l an die Körperelemente gebunden sein.

Der Induktionsfluß durch eine Fläche kann sich ändern: 1. dadurch, daß das Feld zeitlich schwankt (Transformator); 2. dadurch, daß sich bei konstantem Feld die Fläche ändert (durch Bewegung der Körper). Diese zweite Flußänderung wird stets dadurch richtig erhalten, daß man die von der Randlinie[1]) in der Sekunde geschnittene Kraftlinienzahl (besser: den von ihr in 1 s überstrichenen Induktionsfluß) berechnet[2]). (Rotierende glatte Dynamoanker, Unipolarmaschinen). In der Differentialform des Induktionsgesetzes

$$\text{rot}\,\mathfrak{E} = -\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} - \text{rot}\,[\mathfrak{B}\mathfrak{v}]$$

($\mathfrak{v}$ = Geschwindigkeit, $\partial/\partial t$ = Änderung am festen Raumpunkt)

kommt diese Zerlegung der Flußschwankung auch äußerlich zum Ausdruck.

(96) Beispiele.

1. Transformator. Als Randlinie l sei die Achse des Wicklungsdrahtes gewählt; die Enden der Wicklung mögen irgendwie verbunden sein, jedoch so, daß der Verbindungsdraht allein kein nennenswertes Magnetfeld umschließt. Dann besteht die vom Fluß durchsetzte Fläche im wesentlichen aus der von den n Transformatorwindungen berandeten Fläche, die gleich nq ist (q = Kernquerschnitt), daher

$$E_i = \oint \mathfrak{E}\, d\mathfrak{s} = -nq\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t},$$

$\mathfrak{B}$ = Induktion im Transformatorkern. $q\,\mathfrak{B}$ heißt in diesem Falle der Windungsfluß, $n\,q\,\mathfrak{B}$ der Spulenfluß. Ein Modell zur Veranschaulichung der von den n Windungen berandeten Fläche hat F. Emde angegeben (Elektr. u. Maschb., Wien 1912, Heft 47).

2. Prinzip des Wechselstromdynamoankers. Ein Drahtrechteck (Seiten a, b) dreht sich in einem homogenen Magnetfelde $\mathfrak{B}$ um seine zu den Kraftlinien senkrechte Mittelachse (parallel a) mit der Winkelgeschwindigkeit ω. Dann ist der Fluß durch das Rechteck $\Phi = \mathfrak{B}\,a\,b\cos\omega t$, daher

$$E_i = -\partial\Phi/\partial t = \omega\,\mathfrak{B}\,ab\,\sin\omega t.$$

Oder: Nur die zur Drehachse parallelen Seiten a schneiden Induktionslinien. Ihre Geschwindigkeiten $|\mathfrak{v}| = {}^1/_2\,\omega b$ bilden mit den Induktionslinien einen Winkel $180° - \omega t$. Daher ist

$$E_i = \oint \mathfrak{E}\, d\mathfrak{s} = -\int [\mathfrak{B}\mathfrak{v}]\, d\mathfrak{s} = \mathfrak{B}\,\frac{\omega b}{2}\,2a\cdot\sin\omega t$$
$$= \omega\,\mathfrak{B}\,ab\,\sin\omega t,\ \text{wie vorher.}$$

3. Unipolare Induktion. Versuch: Ein Magnetstab M (Abb. 25) drehe sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω um seine Achse AB. Der Punkt B der leitend gedachten Achse sei durch ein Galvanometer G mit einer Schleifbürste C auf dem Umfang des Stabs verbunden. G zeigt dann einen Gleichstrom an.

Erklärung: Man wähle als Randlinie $EBGCDE$. Da die Randlinie an die Körperelemente gebunden ist, so wird das Stück EDC bei der Drehung mitgenommen und gelangt nach einer gewissen Zeit nach ED_1C_1. Es überstreicht also einen gewissen Induktionsfluß, weil das Feld am festen Raumpunkt von der Drehung des Magnetes nicht abhängt. Oder auch: Zur Fläche $EBGCDE$ tritt

---

[1]) Weil die Induktionslinien nirgends enden, div $\mathfrak{B} = 0$, so kann sich hier der Fluß bei festgehaltener Randlinie nicht ändern, wieviel man auch die Fläche sonst deformieren mag.

[2]) Diese Berechnungsart der EMK gilt also für einen speziellen Fall, ist aber kein allgemeines Gesetz. Vgl. F. Emde, Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1908, Heft 46 ff.; 1909, Heft 34.

durch die Drehung der Sektor EDD_1 und das Mantelstück DD_1C_1C hinzu. Der gesamte Induktionsfluß hat sich also um den diesen Teilen angehörenden Betrag vermehrt. Man kann sich vorstellen, daß die von $EBGCC_1D_1E$ berandete Fläche bei der Drehung unbegrenzt wächst, indem sie sich wie eine Haut auf den Magnet aufwickelt. Ist Φ der Fluß durch den Querschnitt des Magnets bei C, so wird $E_i = \omega\Phi/2\pi$. Tiefere Einsicht in die hier vorliegenden Verhältnisse liefert die Erkenntnis der Verteilung der elektrischen Wirbel. Aus der Grundgleichung $-\operatorname{rot}\mathfrak{E} = \partial\mathfrak{B}/\partial t + \operatorname{rot}[\mathfrak{B}\mathfrak{v}]$ folgt, daß hier nur „Flächenwirbel" (Sprünge der Tangentialkomponenten von $\mathfrak{E}$) auftreten, und zwar in der Grenzfläche Magnet-Luft (7). Flächenwirbel von $\mathfrak{E}$ erscheinen in jeder Gleitfläche zweier Körper, die von $\mathfrak{B}$-Linien durchsetzt wird. (Vgl. A. Szarvassi, Ann. d. Phys. (4) Bd. 23, 1907, S. 73.)

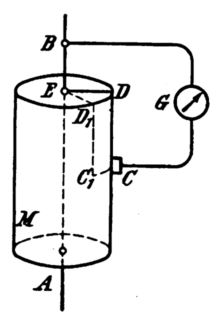


Abb. 25. Unipolare Induktion.

4. Glatte Ring- und Trommelanker.

$$E_i = p\,m\,\Phi\,\frac{n}{60}\,10^{-8}\ \text{Volt}.$$

Φ = von einem Pol zum Anker übertretender Induktionsfluß; m = Zahl der wirksamen Ankerdrähte, n = Umdrehungszahl in der Minute. Bei reiner Parallelschaltung der Ankerzweige ist $p = 1$; bei reiner Reihenschaltung ist p gleich der Polpaarzahl.

5. In Nutenankern pflegt man die EMK nach den für glatte Anker gültigen Formeln zu berechnen. Diese gelten aber hier nur angenähert; denn der physikalische Vorgang ist ein wesentlich anderer, was schon daraus hervorgeht, daß die Ankerdrähte sich stets in dem sehr schwachen Nutenfelde bewegen. Die Verhältnisse in Nutenankern sind von R. Rüdenberg klargestellt worden (Elektrot. u. Maschinenbau 1907, Heft 31, 32).

(97) Lineare Leiter. Wird das veränderliche magnetische Feld von merklich linearen[1]) (und quasistationären) Strömen $I_1, I_2, \ldots$ erzeugt, so ergibt das Induktionsgesetz, wenn man die einzelnen Stromkreise nacheinander als Randlinien wählt:

$$E_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M_{12}\frac{dI_2}{dt} + M_{13}\frac{dI_3}{dt} + \cdots$$

$$E_2 = I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M_{12}\frac{dI_1}{dt} + M_{23}\frac{dI_3}{dt} + \cdots$$

und so fort. Darin sind die $E_1, E_2, \ldots$ die eingeprägten (oder äußeren) EMKe, die $R_1, R_2, \ldots$ die Widerstände, die $L_1, L_2, \ldots$ die Selbstinduktivitäten der entsprechend bezeichneten Kreise. Die $M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}$ sind die Gegeninduktivitäten. Die Größen $-L_\alpha dI_\alpha/dt$ heißen die selbstinduzierten EMKe; $-M_{\alpha\beta}dI_\beta/dt$ ist die vom Strom I_β im Kreis α induzierte EMK (gegenseitige Induktion). Diese Gleichungen können auch auf ein zusammenhängendes Leiternetz angewandt werden, wenn man sich dieses in lauter einfache Schleifen aufgelöst denkt; vgl. Cohn, Das elektromagn. Feld, S. 141 u. 321.

(98) Lenzsches Gesetz. Aus dem Induktionsgesetz ergibt sich, daß die induzierten Ströme stets so gerichtet sind, als wollten sie durch ihr eigenes magnetisches Feld die Feldänderung verhindern (elektromagnetische Trägheit).

(99) Wirbelströme. Wenn sich das magnetische Feld im Innern eines Leiters ändert, so werden in dem Leiter EMKe induziert, die eine Strömung im Leiter hervorrufen. Da sie sich im Leiter selbst schließt, so hat man sie Wirbelströmung

[1]) Streng lineare Leiter gibt es nicht; für solche Leiter würden auch die Induktivitäten ihren Sinn verlieren.

genannt. Sie wirkt nach dem Lenzschen Gesetz entmagnetisierend; auch ist sie mit einer Entwicklung Joulescher Wärme verbunden (Energieverlust). In den Wirbelstrombremsen macht man von diesem Energieumsatz Gebrauch[1]). Zur Verminderung der Wirbelstromverluste baut man Eisenteile, die einen veränderlichen Induktionsfluß führen sollen, aus dünnen Blechen oder Drähten auf.

1. Wirbelströme in Blechen von der Dicke d (cm), dem spezifischen Widerstand ϱ, der Permeabilität μ bei der Frequenz $f=\omega/2\pi$ und der maximalen Induktion $\mathfrak{B}$. Der Joulesche Energieverlust im cm³ für die Sekunde ist (J. J. Thomson, The Electrician, Bd. 28, 1892, S. 594, 599)

$$Q=\frac{\mathfrak{B}^2 d^2 \omega^2}{24\varrho}\cdot\frac{6}{\alpha^3}\frac{\mathfrak{Sin}\,\alpha-\sin\alpha}{\mathfrak{Cos}\,\alpha+\cos\alpha} \quad \text{mit} \quad \alpha=d\sqrt{2\pi\mu\omega/\varrho}$$

Der Faktor

$$\frac{6}{\alpha^3}\frac{\mathfrak{Sin}\,\alpha-\sin\alpha}{\mathfrak{Cos}\,\alpha+\cos\alpha}=1-1{,}596\left(\frac{\omega\mu d^2}{\varrho}\right)^2-\cdots$$

kann für niedere Frequenzen (α klein) durch 1 ersetzt werden. Dann wird (C. P. Feldmann, Wechselstromtransformatoren, S. 155, 1894)

$$Q=\mathfrak{B}^2 d^2\omega^2/24\varrho=\beta\,\mathfrak{B}^2 d^2 f^2.$$

Für gewöhnliches Eisenblech erhält man, d in mm eingesetzt,

$$Q=1{,}6\,\mathfrak{B}^2 d^2 f^2 10^{-13}\ \text{Watt/cm}^3.$$

Eine weitere Folge der Wirbelströme ist eine mit ω und d zunehmende Abschirmung des Feldes aus dem Blechinnern. Schon bei $f=50$, $d=1/2$ mm, $\mu=1000$ sinkt $\mathfrak{B}$ in Richtung der Blechdicke vom Rande bis zur Mitte um 7,85 % (doppelseitige Hautwirkung).

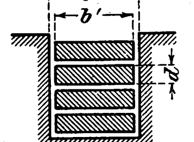


Abb. 26. Wirbelströme in Ankerstäben.

Bei hoher Frequenz (großes α) wird

$$Q=\frac{\mathfrak{B}^2}{8\pi d}\sqrt{\frac{f\varrho}{\mu^3}}.$$

2. Wirbelströme in Ankerstäben[2]) (Abb. 26).

a) Wechselstrommaschinen. Der Joulesche Wärmeeffekt in einem Stab vom Gleichstromwiderstande R_0 ist

$$Q=R_0[I_0^2\varphi(x)+I_1(I_1+I_0)\psi(x)].$$

$I_0=$ Strom in dem betreffenden Stabe, $I_1=$ Gesamtstrom aller darunter liegenden Stäbe.

$$x=d\sqrt{2\pi\mu\omega/\varrho}\sqrt{b'/b},$$

$\varrho=$ spez. Widerstand in Ohm.cm. Führt man statt dessen die spezifische Leitfähigkeit χ in Siemens, bezogen auf einen Stab von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt ein, so erhält man (mit $\mu=1$)

$$x=d\sqrt{\frac{f}{50}}\cdot\sqrt{\frac{b'}{b}}\cdot\sqrt{\frac{\chi}{50}}=\alpha d.$$

Für handwarmes Kupfer ist $\chi=50$, und hiermit für die Frequenz $f=50$ $\alpha=1$.

---

1) Siehe R. Rüdenberg, Energie der Wirbelströme. Stuttgart 1906.

2) A. B. Field, Proc. Am. Inst. of El. Eng. Bd. 24, S. 659; 1905. — F. Emde, Elektrot. und Maschinenbau 1908, Heft 33, 34. — W. Rogowski, Arch. f. Elektrot. Bd. 2, 1913, S. 81; Bd. 4, 1916, S. 293. — R. Richter, Arch. f. Elektrot. Bd. 2, 1914. S. 518; Bd. 3, 1915, S. 175; Bd. 4, 1915, S. 1; Bd. 5, 1916, S. 1; Bd. 5, 1917, S. 335. — W. Hillebrand, Arch. f. Elektrot. Bd. 3, 1915, S. 111. — H. Rikli, E. u. M., Wien 1917, S. 249. — L. Fleischmann, Arch. f. Elektrot. Bd. 8, 1919, S. 203.

Für die Funktionen φ und ψ gelten die Ausdrücke:

	x beliebig	x klein	x groß
$\varphi(x) =$	$x \frac{\mathfrak{Sin}\,2x + \sin 2x}{\mathfrak{Cof}\,2x - \cos 2x}$	$1 + \frac{x^4}{11{,}25}$	x
$\psi(x) =$	$2x \frac{\mathfrak{Sin}\,x - \sin x}{\mathfrak{Cof}\,x + \cos x}$	$\frac{x^4}{3}$	$2x$

Die Wirbelstromverluste treten in dem in der Nut eingebetteten und vom Nutenstreufeld durchsetzten Teil des Stabes ein. Bezeichnet l_n die Länge des Stabteils in der Nut, l_s die Länge des Stabteils außerhalb der Nut (in den Stirnverbindungen), λ das Verhältnis l_s/l_n, so ist das Verhältnis des Wechselstromwiderstandes r zum Gleichstromwiderstand r_0 des p-ten Stabes (p vom Nutengrund aus gezählt, alle Stäbe vom gleichen Strom durchflossen)

$$K_p = \frac{r}{r_0} = \frac{k_p + \lambda}{1 + \lambda}$$

mit

$$k_p = \varphi(x) + (p^2 - p)\,\psi(x).$$

Daraus folgt der Gesamtwiderstand aller Stäbe in einer Nut, wenn s die Zahl der übereinanderliegenden Stäbe ist, und wenn jeder Stab denselben Gesamtstrom führt, ausgedrückt in Teilen des Gleichstromwiderstandes, zu

$$K_s = \frac{R}{R_0} = \frac{k_s + \lambda}{1 + \lambda}$$

mit

$$k_s = \varphi(x) + \frac{s^2 - 1}{3}\,\psi(x).$$

Die Folge der Wirbelströme ist eine Zusammendrängung der Stromlinien an der oberen (äußeren) Kante des Stabquerschnittes (einseitige Hautwirkung).

Wird bei gegebener Stabzahl die Stabhöhe d vergrößert, so sinkt der Widerstand bis auf ein Minimum, um dann wieder anzusteigen. Das Widerstandsminimum tritt bei der sog. kritischen Stabhöhe

$$d_0 = \frac{1{,}3}{\alpha\sqrt{s}}\sqrt[4]{1 + \lambda}$$

ein und beträgt das 1,33fache des Gleichstromwiderstandes.

Wird bei gegebener Nutentiefe $D = s\,d$ die Stabzahl s erhöht, und wird wieder dafür gesorgt, daß jeder Stab den gleichen Strom führt, so kann das Widerstandsverhältnis zunächst wachsen, um erst bei weiterer Unterteilung des Leiters zu sinken. Die ungünstigste Stabzahl beträgt $s_u = 0{,}55\,\alpha D$; man erhöht die Zahl der Stäbe zweckmäßig auf $s_k = 0{,}58\,\alpha^2 D^2$, wobei das Widerstandsverhältnis gleich 1,33 wird.

Die Gleichheit der Ströme in den einzelnen Stäben ist bei Hintereinanderschaltung der Stäbe von selbst gegeben; bei der Parallelschaltung erreicht man sie durch Verschränkung der Stäbe (nach Hillebrand) oder durch magnetische Hilfskreise (nach Richter).

b) Gleichstrommaschinen. In jedem Ankerstabe fließt ein Wechselstrom, der bei richtiger Stromwendung nahezu trapezförmig verläuft. Die Wirbelstromverluste sind bei dieser Stromform größer als bei sinusförmigem Wechselstrom; im übrigen gelten in beiden Fällen ähnliche Beziehungen. Näheres bei L. Dreyfus, E. u. M. (Wien) 1914, S. 281 ff.; Arch. f. Elektrot. Bd. 3, 1915 S. 273.

c) Einankerumformer. Hier liegen die Verhältnisse ähnlich wie unter b); vgl. L. Dreyfus, Arch. f. Elektrot. Bd. 4, 1915, S. 42.

3. Zylindrische Spulen[1]). Infolge der Wirbelströme wird die Stromdichte auf der dem Spuleninnern zugewandten Seite des Drahtes höher, auf der Außenseite niedriger als die mittlere (einseitige Hautwirkung). Die Widerstandserhöhung ist nach den unter 2 a angegebenen Formeln zu berechnen, wobei für b die Ganghöhe g einzusetzen ist, w die Zahl der Wicklungslagen bedeutet. Ferner ist $\lambda = 0$ und $b' = d$. Bei runden Drähten vom Radius r hat man $d = 1{,}78\,r$ zu setzen.

Zur Verminderung der Widerstandserhöhung wickelt man die Spule aus Litzendraht. Die Litze muß so hergestellt sein, daß jeder Einzeldraht gleich oft an jeder Stelle des Litzenquerschnitts liegt (z. B. durch mehrfache Verdrillung nach Dolezalek). Für eine Spule aus Litze mit rundem Querschnitt, die aus z Einzeldrähten vom Radius r besteht, ergibt sich das Widerstandsverhältnis mit

$$x = 1{,}78\,\alpha\, r, \qquad \alpha = \frac{1}{50}\sqrt{f\chi\sqrt{z}\,\frac{1{,}78\,r}{g}}$$

zu

$$k = \frac{R}{R_0} = \varphi(x) + \frac{w^2 z - 1}{3}\,\psi(x).$$

Die Funktionen φ und ψ haben die unter 2 angegebene Bedeutung.

Aus Untersuchungen Lindemanns sowie aus den vorstehenden Formeln ergibt sich, daß bei der Unterteilung des Drahtes zur Litze unter Umständen der Widerstand zuerst wächst und erst bei weiterer Unterteilung abnimmt. Der Grund ist derselbe wie bei den unter 2 a behandelten Ankerstäben.

4. Wirbelströme in einem geraden Draht (Radius r in cm). Hier verursachen die Wirbelströme ein Zusammendrängen der Stromlinien am Rand des Querschnitts (allseitige Hautwirkung). Feldverteilung und effektiver Widerstand werden durch eine einzige Größe $x = r\mathfrak{k}\sqrt{f}$ bestimmt. $\mathfrak{k} = \pi\sqrt{\mu/\varrho}$ $\left(= \pi\sqrt{\frac{\mu\, 10^{-5}}{\varrho_1}}\right.$, wenn ϱ_1 in Ohm für 1 m und 1 mm² ausgedrückt ist).

Für Cu mit $\varrho_1 = 0{,}0175$ ist $\mathfrak{k} = 0{,}075$
,, Al ,, $\varrho_1 = 0{,}035$,, $\mathfrak{k} = 0{,}053$
,, Zn ,, $\varrho_1 = 0{,}063$,, $\mathfrak{k} = 0{,}040$.

Der Widerstandszuwachs ergibt sich angenähert aus den Formeln

$$\text{für } x = 0 \text{ bis } 0{,}8 \qquad \frac{R}{R_0} = 1 + \frac{x^4}{3} - \frac{4}{45}x^8,$$

$$\text{für } x = 1{,}5 \text{ bis } 10 \qquad \frac{R}{R_0} = 0{,}997\,x + 0{,}277,$$

$$\text{für } x > 2 \qquad \frac{R}{R_0} = x + \frac{1}{4} + \frac{3}{64\,x}.$$

In dem Bereich $x = 0{,}8$ bis $1{,}5$ ist keine dieser Formeln anwendbar; der Widerstandszuwachs ist der folgenden Tafel zu entnehmen.

x	R/R_0	x	R/R_0	x	R/R_0	x	R/R_0	x	R/R_0
0,70	1,07	0,90	1,18	1,10	1,35	1,25	1,50	1,40	1,66
0,75	1,09	0,95	1,22	1,15	1,40	1,30	1,56	1,45	1,72
0,80	1,11	1,00	1,26	1,20	1,45	1,35	1,61	1,50	1,77
0,85	1,14	1,05	1,31						

[1]) A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. (4) Bd. 15, 1904, S. 687 — R. Lindemann, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. 1910, S. 572. — W. Rogowski, Archiv f. Elektrot. Bd. 3, 1915, S. 264; Bd. 4, 1915, S. 61.

Strenge Formeln und Zahlentafeln finden sich in den „Funktionentafeln" von Jahnke und Emde, 1909, S. 142.

Laufen Hin- und Rückleitung in geringem Abstande einander parallel (z. B. in Kabeln), so tritt eine einseitige Hautwirkung auf, die Stromlinien drängen sich auf den einander zugekehrten Seiten der beiden Querschnitte zusammen (G. Mie, Ann. d. Phys. (4) Bd. 2, S. 201, 1900).

In allen Fällen wächst die Wirbelstromwärme (der effektive Widerstand) zunächst — bei geringer Frequenz — proportional dem Quadrat der Frequenz; dann langsamer; zuletzt nur proportional der Quadratwurzel aus der Frequenz.

Die Stromverdrängung hat neben der Erhöhung des Widerstandes auch eine Verringerung der Induktivität zur Folge (Formeln bei Jahnke u. Emde, a. a. O.); um diese Wirkung der Wirbelströme zu vermeiden, müssen Normalrollen für Selbstinduktion aus sehr dünnem Draht oder aus feindrähtigen Litzen hergestellt werden.

Für Leitungen aus Eisen sind die vorstehenden Formeln nicht anwendbar, weil die Permeabilität von der Stromstärke abhängt. Eingehende Versuche über die Widerstandserhöhung von Eisenleitungen bei Wechselstrom sind auf Veranlassung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker ausgeführt und in seinen „Ausnahmebestimmungen während des Krieges" (4. Aufl. 1917) abgedruckt worden (s. auch ETZ 1914, S. 1109; 1915, S. 44). Hiernach steigt das Widerstandsverhältnis R/R_0 mit zunehmender Stromdichte bis auf ein Maximum an, das bei 3 bis 6 mm dicken Drähten bei 0,5 bis 1 A/mm² erreicht wird, um dann wieder abzunehmen. Der größte Widerstandszuwachs beträgt je nach der Drahtstärke 50 bis 150% und hängt bei Litzendrähten (Seilen) auch von der Art der Verseilung ab. Ferner wurde die Stromverdrängung in Eisendrähten von G. Hilpert und H. Schleicher (Arch. f. Elektrot. Bd. 7, 1918, S. 144), L. Truxa (ebenda, Bd. 8, 1919, S. 137) und K. Zickler (Elektrot. u. Masch., Wien 1919, S. 449 und 1920, S. 165) untersucht.

5. Wirksamer Widerstand. Der im vorhergehenden (Absatz 2 bis 4) verwendete Begriff des wirksamen oder effektiven Widerstandes R eines Leiters für Wechselstrom von bestimmter Frequenz ist diejenige Größe, die mit dem Quadrat des Gesamtstromes multipliziert die gesamte Joulesche Stromwärme ergibt. Ein Gleichstrom verteilt sich so über den Querschnitt des Leiters, daß die Stromwärme möglichst klein wird; daher ist R stets größer als der Gleichstromwiderstand R_0.

Der Begriff des wirksamen Widerstandes läßt sich noch weiter ausdehnen. Wenn z. B. Wechselstrom in einer Spule mit Eisenkern fließt, so daß außer in der Wicklung auch in dem Eisenkern elektromagnetische Energie nichtumkehrbar in Wärme verwandelt wird (durch Wirbelströme und Hysterese), so nennt man wirksamen Widerstand der Spule diejenige Größe R, die mit dem Quadrat des Stromes multipliziert, den gesamten vom Strome unmittelbar oder mittelbar (durch Vermittlung seines Magnetfeldes) hervorgerufenen Wärmeeffekt ergibt. Ganz allgemein kann man den wirksamen Widerstand R eines Stromzweiges durch die Gleichung

$$N = RI^2$$

bestimmen; darin ist I die Stromstärke, N die durch den Strom I dem Zweige zugeführte Leistung; dabei ist wesentlich, daß in dem Zweig keine fremde d. i. vom Strom unabhängige EMK wirkt.

Energiebeziehungen im elektromagnetischen Felde; mechanische Kräfte.

(100) Energiebeziehungen im Felde linearer Ströme[1]. Das Energiegesetz nimmt hier die Form an (wenn man die Änderungen der elektrischen Energie vernachlässigt)

$$\text{đ}A + \Psi \, \mathrm{d}t = -\mathrm{d}W_m .$$

$\text{đ}A$ = Arbeit, die die mechanischen Kräfte elektromagnetischen Ursprungs bei einer unendlich kleinen Verschiebung und Gestaltsänderung der Stromkreise oder bei der Bewegung der Eisenmassen leisten.

$\Psi \mathrm{d}t = \sum_\alpha I_\alpha^2 R_\alpha - E_\alpha I_\alpha$, die Zunahme der nichtelektromagnetischen Energie [Joulesche Wärme + chemische Energie usw., (53) und (55)]

$-\mathrm{d}W_m$ = Abnahme der magnetischen Energie (91) $\mathrm{d}W_m = \partial_I W_m + \partial_B W_m$

$\partial_I W_m$ = Teilzunahme von W_m bei festgehaltener Lage der Stromkreise wegen der Änderung der Ströme

$\partial_B W_m$ = Teilzunahme von W_m bei konstanten Strömen wegen der Bewegung.

G r u n d g e s e t z. Es ist[2] $\text{đ}A = +\partial_B W_m$.

Mechanische Arbeit = Teil z u nahme der magnetischen Energie wegen der Lagenänderung bei k o n s t a n t g e d a c h t e n Strömen (auch wenn sich die Ströme bei der Bewegung t a t s ä c h l i c h ändern).

B e i s p i e l. Für zwei Stromkreise ist

$$W_m = {}^1/_2 L_1 I_1^2 + M_{12} I_1 I_2 + {}^1/_2 L_2 I_2^2 ,$$
$$\partial_B W_m = {}^1/_2 I_1^2 \mathrm{d}L_1 + I_1 I_2 \mathrm{d}M_{12} + {}^1/_2 I_2^2 \mathrm{d}L_2 ,$$
$$\partial_I W_m = (L_1 I_1 + M_{12} I_2)\mathrm{d}I_1 + (L_2 I_2 + M_{12} I_1)\mathrm{d}I_2 .$$

(101) Die mechanischen Kräfte können oft einfach aus der Arbeit $\text{đ}A$ (100) bei einer virtuellen Verrückung der betreffenden Körper ermittelt werden. Manchmal sind sie aber auch bequem unmittelbar zu berechnen.

a) A l s R a u m k r ä f t e. Ist $\mathfrak{B}$ die Induktion, $\mathfrak{H}$ die magnetische Feldstärke, μ die Permeabilität, $\mathfrak{i}$ die Stromdichte im Raumteil $\mathrm{d}v$, so wird die Kraft

$$\mathfrak{K} = \int \mathrm{d}v \left\{ [\mathfrak{i}\,\mathfrak{B}] - \frac{1}{8\pi} \mathfrak{H}^2 \operatorname{grad} \mu \right\} .$$

$[\mathfrak{i}\,\mathfrak{B}]$ ist die Kraft auf einen homogenen Stromleiter; für einen vom Strom I Ampere durchflossenen und zum Magnetfeld senkrecht stehenden linearen Leiter von l cm Länge wird z. B. $\mathfrak{K} = 0{,}1\, \mathfrak{B}\, Il$ dyn $\approx \mathfrak{B}\, Il \cdot 10^{-4}$ gramm. $\mathfrak{K}$ steht auf der Strom- und der Feldrichtung senkrecht. Das Glied $1/8\pi \cdot \mathfrak{H}^2 \operatorname{grad} \mu$ ist die Kraft auf Eisen; sie sucht es so zu stellen, daß der Induktionsfluß möglichst groß wird. Wenn μ von $\mathfrak{H}$ abhängt, so lautet dieses Glied[3] $-\frac{1}{4\pi}\int_0^{\mathfrak{H}} (\mathfrak{H}\, \mathrm{d}\mathfrak{H}) \operatorname{grad} \mu$.

b) A l s F l ä c h e n k r ä f t e, ebenso wie in (49). Der Betrag von $\mathfrak{T}$ ist hier $\mu \mathfrak{H}^2/8\pi$; der Winkel zwischen der Flächennormalen und $\mathfrak{T}$ wird durch $\mathfrak{H}$ halbiert. Wendet man diese Darstellung auf ein Stück weiches Eisen an, so ergibt sich, daß jedes Oberflächenelement $\mathrm{d}f$ einen senkrecht nach außen gerichteten Zug von der Stärke

$$\mathrm{d}f \left\{ \frac{\mathfrak{B}_n^2}{8\pi} \frac{\mu - 1}{\mu} + \frac{\mathfrak{H}_t^2}{8\pi} (\mu - 1) \right\} = \mathrm{d}f \frac{\mu - 1}{8\pi} \mathfrak{H}_{\text{Eisen}} \mathfrak{H}_{\text{Luft}} = -\frac{\mathrm{d}f}{8\pi} \mathfrak{H}_{\text{Eisen}} \mathfrak{H}_{\text{Luft}} \cdot \operatorname{Grad} \mu$$

[1]) Über die Anwendung dieser Beziehungen bei der Berechnung der Elektromagnete siehe F. E m d e, Elektrot. und Maschinenbau, 1906, S. 945; ETZ 1908, S. 817.

[2]) Streng genommen nur, wenn μ konstant ist, d. h. im eisenfreien Felde; vergl. E. C o h n, Das elektromagn. Feld, S. 524 bis 526.

[3]) E. C o h n, Das elektromagnetische Feld (Leipzig 1900), S. 517.

erfährt [1]). $\mathfrak{B}_n$ = Normalkomponente der Induktion. $\mathfrak{H}_t$ = Tangentialkomponente der Feldstärke an der Oberfläche. Die häufig gebrauchte Näherungsformel df $\mathfrak{B}^2/8\pi$ ist also nur richtig, wenn μ groß ist und $\mathfrak{H}$ auf der Oberfläche genau senkrecht steht; schon eine verhältnismäßig kleine Komponente $\mathfrak{H}_t$ verursacht bei großem μ einen erheblichen Fehler der Näherungsformel [2]).

(102) Der Energiestrom. Ist (48, 91)

$$W = \frac{1}{8\pi c^2}\int\limits_V \mathrm{d}v\, \varepsilon\, \mathfrak{E}^2 + \frac{1}{8\pi}\int\limits_V \mathrm{d}v\, \mu\, \mathfrak{H}^2$$

die gesamte in einem Raum V enthaltene elektromagnetische Energie, $Q = \int \varrho\, \mathfrak{i}^2 \mathrm{d}v$ die daselbst in der Sekunde entwickelte Joulesche Wärme (53), so ist die Abnahme der elektromagnetischen Energie $-\partial W/\partial t$ gleich der erzeugten Jouleschen Wärme, vermehrt um den durch die Oberfläche F des Raumes V austretenden elektromagnetischen Energiestrom $\int\limits_F \mathrm{d}f\, \mathfrak{S}_n$:

$$-\frac{\partial W}{\partial t} = Q + \int\limits_F \mathrm{d}f\, \mathfrak{S}_n.$$

Es findet nämlich im elektromagnetischen Felde eine Energieströmung von der Dichte

$$\mathfrak{S} = \frac{[\mathfrak{E}, \mathfrak{H}]}{4\pi}$$

statt. Ihr Betrag ist gleich dem $\frac{1}{4\pi}$ fachen Inhalt des aus $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ konstruierten Parallelogramms; ihre Richtung steht auf der elektrischen und magnetischen Feldstärke senkrecht. Wendet man diesen Satz z. B. auf eine elektrische Kraftübertragung an, so findet man, daß der Energiestrom im wesentlichen in dem Luftraum zwischen Hin- und Rückleitung (beim Kabel im Dielektrikum), und zwar parallel zu den Drahtachsen verläuft; nur ein geringer Teil des Energiestroms biegt seitlich ab und wandert in die Drähte hinein, um den Energieverlust durch Joulesche Wärme zu decken. Bei Dynamomaschinen beginnt der elektromagnetische Energiestrom auf der Ankeroberfläche und fließt dann zwischen den Drähten über den Kollektor nach dem Netze; vgl. Emde, Elektrot. u. Maschb. (Wien) 1909, Heft 40.

(103) Elektromagnetische Wellen. Wenn sich in einem begrenzten Gebiete V die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ oder die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ ändert, so wird auch die Umgebung dieses Störungsgebietes nach und nach in Mitleidenschaft gezogen. t Sek. nach einer Feldänderung in V hat sich ein elektromagnetisches Feld außerhalb von V in einem Raum V_1 ausgebildet. Ist der Raum um V homogen und isotrop, so enthält V_1 alle Punkte, deren Entfernung von irgendeinem Punkte in V den Wert

$$s = vt \text{ cm} \left(v = 3 \cdot 10^{10}/\sqrt{\varepsilon\mu}\ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right)$$

---

[1]) F. Emde, Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1906, S. 976, Fußnote; ebenda, 1910, S. 35; 1916, Heft 12 u. 13; Elektr. Kraftb. u. Bahnen, 1910, Heft 27. — W. Kaufmann, Müller-Pouillets Lehrbuch d. Phys., 10. Aufl., Bd. 4, Abt. 1, S. 87. Braunschweig 1908.

[2]) Vgl. hierzu die Dissertationen von K. Euler, Untersuchung eines Zugmagneten für Gleichstrom, Berlin 1911, und die Besprechung hierüber in der ETZ 1911, S. 1269, und von P. Kalisch, Beiträge zur Berechnung der Zugkraft von Elektromagneten, Breslau 1913, auch Archiv f. Elektrot. Bd. 1, 1913, S. 394, 458, 476. Ferner: F. Emde, Auszüge aus J. C. Maxwells Elektrizität u. Magnetismus, Braunschweig 1915, S. 121 ff.

nicht überschreitet[1]). Die Grenze des Raumes V_1 ist die Fläche, die sämtliche Kugeln vom Radius s cm umhüllt, deren Mittelpunkte auf der Oberfläche von V liegen. V_1 wird also mit der Zeit immer größer und nähert sich mehr und mehr einer Kugel vom Radius vt, deren Mittelpunkt im Raum V liegt.

Daraus ergibt sich: Wenn die Feldstärken in V periodisch schwanken, so bildet sich eine mit der Geschwindigkeit v von V forteilende elektromagnetische Welle aus, die in größerer Entfernung von ihrem Ursprung mehr und mehr in eine Kugelwelle übergeht. In der Kugelwelle steht die elektrische und die magnetische Feldstärke überall auf dem Radius senkrecht; der Energiestrom $\mathfrak{S}$ (102) ist radial nach außen gerichtet.

Der Vorgang der Wellenausbreitung läßt sich durch die Anwendung des Induktionsgesetzes (95) und des Gesetzes vom magnetischen Kreis (86) in einfacher Weise erklären (K. W. Wagner, ETZ 1913, S. 1053).

Die elektromagnetischen Wellen wurden von H. Hertz zuerst experimentell nachgewiesen (1887), nachdem lange vorher Maxwell aus den Gesetzen des elektromagnetischen Feldes ihr Dasein erschlossen hatte. Maxwell hat auch zuerst erkannt, daß Wärme- und Lichtstrahlen elektromagnetische Wellenstrahlen von sehr kurzer Periodendauer (kleiner Wellenlänge) sind.

Die kürzesten bekannten elektromagnetischen Wellen sind die Röntgenstrahlen und die γ-Strahlen radioaktiver Elemente. Sie geben Kunde von den Störungen, die das elektromagnetische Feld im Innern des Atoms erfährt, wenn dieses entweder durch ein aufprallendes Elektron von hoher Geschwindigkeit (einen Kathodenstrahl) oder durch die explosionsartige Loslösung eines Elektrons aus dem Atomverband heftig erschüttert wird. (Vergl. A. Sommerfeld, Atombau u. Spektrallinien, Braunschweig 1919.)

Die allseitige Ausbreitung elektromagnetischer Störungen in einem homogenen Raume wird beeinträchtigt, wenn man in diesen Raum Leiter hineinbringt; die Wellen gleiten in diesem Falle vorzugsweise an den Leitern entlang. So wirkt die leitende Erdoberfläche als Führung für die Wellen der drahtlosen Telegraphie. Die Führung ist um so vollkommener, je besser der führende Körper leitet; an Metalldrähten (Leitungen, Kabeln) geschieht deshalb die Wellenausbreitung im wesentlichen nur in Richtung der Drahtachse (115 c).

Werte einiger Wellenlängen (in Luft).

Benennung der Erscheinung	Frequenz	Wellenlänge
Technischer Wechselstrom	50	6000 km
Fernsprechströme	800	375 km
Drahtlose Telegraphie von	20000	15000 m
bis	$2 \cdot 10^6$	150 m
Hertzsche Wellen, 1888	$5 \cdot 10^8$	60 cm
Schnellste elektrische Schwingungen (von Baeyer 1895)	$2 \cdot 10^{11}$	1,5 mm
Längste bekannte Wärmestrahlen Quarzquecksilberlampe (Rubens und von Baeyer, 1911)	rd. 10^{12}	im Mittel 0,313 mm
Auerstrumpf (Rubens und Hollnagel, 1910)	$3 \cdot 10^{12}$	0,1 mm
Rotes Licht	$4,5 \cdot 10^{14}$	0,00067 mm
Violettes Licht	$8 \cdot 10^{14}$	0,00038 mm
Kürzeste bekannte ultraviolette Strahlen (Schumann, 1893)	$3 \cdot 10^{15}$	0,00010 mm

[1]) Birkeland, Archives de Genève, Bd. 34, S. 1; 1895; E. Cohn, Das elektromagn. Feld. S. 412.



Benennung der Erscheinung	Frequenz	Wellenlänge
Röntgenstrahlen:		
Weichste bisher bekannte Eigenstrahlung (K-Serie des Natriums, L-Serie des Zinks)	$2{,}5 \cdot 10^{18}$	rd. $0{,}12 \cdot 10^{-6}$ mm
Strahlung einer sehr weichen Röntgenröhre (20000 V) . . .	$4 \cdot 10^{18}$	rd. $0{,}07 \cdot 10^{-6}$ mm
Strahlung einer sehr harten Röntgenröhre (100000 V)	$2 \cdot 10^{19}$	rd. $0{,}015 \cdot 10^{-6}$ mm
γ-Strahlen des Radiums und Mesothoriums	$4 \cdot 10^{19}$	rd. $0{,}007 \cdot 10^{-6}$ mm
härteste bekannte Eigenstrahlung (K-Serie, α_1-Linie des Wolframs, nach M. Siegbahn)	$1{,}5 \cdot 10^{20}$	$0{,}0021 \cdot 10^{-6}$ mm

Lehrbücher der Theorie des elektromagnetischen Feldes. J. C. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism, 2 Vol., Oxford 1873; deutsch von Weinstein, Berlin 1883. — E. Mascart u. J. Joubert, Leçons sur l'électricité et le magnétisme, 2 Vol., Paris 1882. — H. Poincaré, Electricité et optique, Paris 1890. — A. Vaschy, Traité d'Electricité et de Magnétisme, 2 Bde., Paris 1890. — O. Heaviside, Electrical papers, 2 Vol., London 1892. — Derselbe, Electromagnetic theory, 3 Vol., London 1893, 1899, 1912. — J. J. Thomson, Notes on recent researches in electricity and magnetism, Oxford 1893. — E. Cohn, Das elektromagnetische Feld, Leipzig 1900. — Abraham-Föppl, Theorie der Elektrizität, Bd. 1, Leipzig 1894, 1904, 1907, 1912, 1918. — F. Emde, Auszüge aus J. C. Maxwells Elektrizität und Magnetismus, Braunschweig. 1915.

Elementare: J. Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie, Stuttgart 1905. — W. Kaufmann, Bd. 4, Abt. 1 von Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik, 10. Aufl., Braunschweig 1909. — G. Mie, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Stuttgart 1910.

Veränderliche Ströme.

(104) Wechselströme. Über die Berechnung der Stärke, der Spannung und Leistung von Strömen wechselnder Stärke oder Richtung lauten die „Bestimmungen zur Ausführung des Gesetzes, betr. die elektrischen Maßeinheiten" folgendermaßen:

a) Als wirksame (effektive) Stromstärke — oder, wenn nichts anderes festgesetzt ist, als Stromstärke schlechthin — gilt die Quadratwurzel aus dem zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Augenblicks-Stromstärken;

b) als mittlere Stromstärke gilt der ohne Rücksicht auf die Richtung gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksstromstärken;

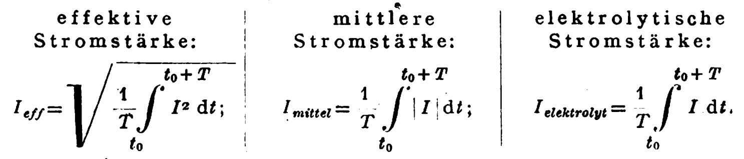
c) als elektrolytische Stromstärke gilt der mit Rücksicht auf die Richtung gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksstromstärken;

d) als Scheitelstromstärke periodisch veränderlicher Ströme gilt deren größter Augenblickswert;

e) die unter a) bis d) für die Stromstärke festgesetzten Bezeichnungen und Berechnungen gelten ebenso für die elektromotorische Kraft oder die Spannung;

f) als Leistung gilt der mit Rücksicht auf das Vorzeichen gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksleistungen.

Bezeichnet also I die Augenblicksstromstärke, T die Periodendauer, t_0 einen beliebigen festen Zeitpunkt, dt ein Zeitteilchen, so ist die



effektive Stromstärke:	mittlere Stromstärke:	elektrolytische Stromstärke:
$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} I^2\,dt}$;	$I_{mittel} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} \lvert I \rvert\,dt$;	$I_{elektrolyt} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} I\,dt$.

Die effektive Stromstärke ist der von Hitzdraht- und dynamometrischen Instrumenten angezeigte Wert und heißt darum im allgemeinen „Stromstärke“ schlechthin. Sie ist gleich derjenigen Gleichstromstärke, die in den genannten Instrumenten denselben Ausschlag hervorbringen würde wie der Wechselstrom. Die auch zur Messung der effektiven Stromstärke benutzten Ferraris- und Weicheiseninstrumente können nur für e i n e F r e q u e n z und für eine b e s t i m m t e K u r v e n f o r m genau geeicht werden; bei fester effektiver Stromstärke ändert sich ihr Ausschlag mit der Frequenz und mit der Kurvenform.

Ist E die Augenblicksspannung, so ist die Leistung des Wechselstromes

$$N = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} E\,I\,dt\,.$$

(105) Sinusförmige Ströme. Für viele Fälle genügt es anzunehmen, daß Spannungen und Stromstärken sinusförmig verlaufen. Bei einem sinusförmigen Strom verhalten sich wirksame Stromstärke, mittlere Stromstärke und Scheitelstromstärke wie

$$\frac{1}{2}\sqrt{2} : \frac{2}{\pi} : 1 = 0{,}707 : 0{,}637 : 1$$
$$= 1{,}110 : 1 : 1{,}570 = 1 : 0{,}901 : 1{,}414\,.$$

Eine sinusförmige EMK wird dargestellt durch die Gleichung

$$E = E_0 \sin \omega t, \text{ wo zur Abkürzung}$$
$$\omega = 2\pi f \text{ gesetzt ist.}$$

Darin bedeutet t die veränderliche Zeit, f die Zahl der Perioden in der Sekunde, d. i. die F r e q u e n z , E_0 die Scheitelspannung.

Besitzt der Strom die Phasenverschiebung φ gegen diese Spannung, so ist er darstellbar in der Form

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi)\,.$$

Ist φ positiv, so eilt der Strom in der Phase der Spannung voraus, ist φ negativ, so bleibt er um diesen Winkel in der Phase hinter der Spannung zurück.

Die L e i s t u n g eines Wechselstroms, dessen Spannung und Stromstärke dargestellt werden durch

$$E_0 \sin \omega t \text{ und } I_0 \sin(\omega t \pm \varphi),$$

beträgt

$${}^1/_2 E_0 I_0 \cos\varphi - {}^1/_2 E_0 I_0 \cos(2\omega t \pm \varphi),$$

also im Mittel

$$N = \frac{1}{2} E_0 I_0 \cos\varphi = E_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi\,.$$

$\cos\varphi$ nennt man den L e i s t u n g s f a k t o r.

(106) Wechselströme von beliebiger Kurvenform. In der Regel wird die Form eines Wechselstromes innerhalb einer Periode nicht sinusförmig sein. Ein derartiger Wechselstrom von beliebiger Kurvenform läßt sich stets durch eine Fouriersche Reihe darstellen; diese hat allgemein die Form

$$I = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + I_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + I_3 \sin(3\omega t + \alpha_3) + \cdots,$$

d. h. der Strom kann angesehen werden als zusammengesetzt aus einer Gleichstromkomponente I_0 und aus Wechselströmen von verschiedenen Periodenzahlen, die sich wie 1 : 2 : 3 . . . verhalten. Diese nennt man auch die h a r m o n i s c h e n K o m p o n e n t e n des Wechselstromes; die langsamste Schwingung heißt G r u n d s c h w i n g u n g , die übrigen heißen die O b e r s c h w i n g u n g e n. Die Gleichstromkomponente I_0 hat auf den Verlauf der Wechselströme — von



gewissen Ausnahmefällen abgesehen — keinen Einfluß und werde daher im folgenden außer Betracht gelassen. Die geradzahligen Komponenten können ausgelassen werden, wenn die positiven und negativen Hälften der Kurve spiegelbildlich gleich sind [d. h. wenn $I(t) = -I(t + 1/2\,T)$ ist]; bei technischen Wechselströmen trifft dies meistens zu. Der Effektivwert des Stromes ist:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2}(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots)}.$$

Der Strom I sei von einer EMK E erzeugt von der Gleichung

$$E = E_1 \sin(\omega t + \beta_1) + E_2 \sin(2\omega t + \beta_2) + E_3 \sin(3\omega t + \beta_3) + \cdots.$$

Dann ist die Leistung

$$N = 1/2\,[E_1 I_1 \cos(\alpha_1 - \beta_1) + E_2 I_2 \cos(\alpha_2 - \beta_2) + E_3 I_3 \cos(\alpha_3 - \beta_3) + \cdots].$$

Wie man sieht, liefert eine Spannungskomponente nur mit einer Stromkomponente von gleicher Frequenz einen Beitrag zur Leistung. Man setzt $N = k \cdot E_{eff} \cdot I_{eff}$ und nennt k den Leistungsfaktor. Dieser ist kleiner als 1 und kann daher rechnungsmäßig gleich $\cos\varphi$ gesetzt werden; man nennt dann φ die wirksame Phasenverschiebung. Nur wenn $\alpha_1 = \beta_1$, $\alpha_2 = \beta_2 \cdots$ und $E_1 : I_1 = E_2 : I_2 = \cdots$ ist, wird $k = 1$. (Vgl. E. Orlich, Theorie der Wechselströme, Leipzig 1912, Abschnitt 13 und 16.)

(107) Bestimmung der harmonischen Komponenten eines Wechselstromes.

a) Liegt ein analytischer Ausdruck für die Stromkurve vor, etwa $I = F(t)$, wobei F eine periodische Funktion mit der Periode T sein soll, so wünscht man I in der Form

$$I = F(t) = A_0 + A_1 \cos\omega t + A_2 \cos 2\omega t + \cdots$$
$$+ B_1 \sin\omega t + B_2 \sin 2\omega t + \cdots$$

darzustellen. Dabei ist $\omega = \frac{2\pi}{T}$, ferner (vgl. 106)

$$I_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}; \qquad \operatorname{tg}\alpha_k = \frac{A_k}{B_k}, \quad \text{oder}$$

$$A_k = I_k \sin\alpha_k, \qquad B_k = I_k \cos\alpha_k.$$

Die Koeffizienten A_k und B_k ergeben sich nun wie folgt

$$A_0 = \frac{1}{T}\int_0^T F(t)\,dt,$$

$$A_k = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\cos k\omega t\,dt, \qquad B_k = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\sin k\omega t\,dt.$$

Besitzt die Kurvenform $F(t)$ gewisse Symmetrien, so lassen sich diese Ausdrücke noch vereinfachen.

b) Ist die Stromkurve empirisch gegeben, etwa als Oszillogramm, so teile man das Periodenintervall in eine Anzahl r gleicher Teile und bestimme die zugehörigen Ordinaten y_λ $(\lambda = 1, 2, \ldots r)$; dann ist

$$A_0 = \frac{1}{r}\sum_{\lambda=1}^{r} y_\lambda$$

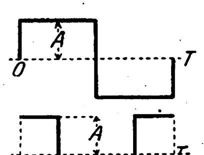
$$A_k = \frac{2}{r}\sum_{\lambda=1}^{r} y_\lambda \cos k\frac{2\pi\lambda}{r} \qquad B_k = \frac{2}{r}\sum_{\lambda=1}^{r} y_\lambda \sin k\frac{2\pi\lambda}{r}.$$

Die Zahl r der Teile muß gleich oder größer sein als $2k+1$.

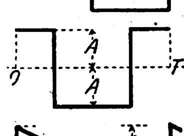
Darstellung verschiedener periodischer Kurven durch Fouriersche Reihen.

(Abb. 27a bis m.)

1. Rechteck

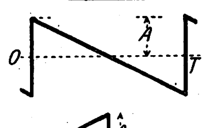


$$F = \frac{4A}{\pi}\left[\sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \cdots\right]$$

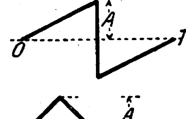


$$F = \frac{4A}{\pi}\left[\cos\omega t - \frac{1}{3}\cos 3\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \cdots\right]$$

2. Säge

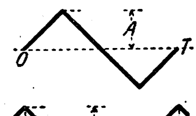


$$F = \frac{2A}{\pi}\left[\sin\omega t + \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \cdots\right]$$

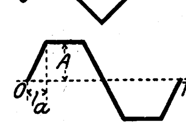


$$F = \frac{2A}{\pi}\left[\sin\omega t - \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t - \cdots\right]$$

3. Dreieck

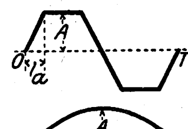


$$F = \frac{8A}{\pi^2}\left[\sin\omega t - \frac{1}{9}\sin 3\omega t + \frac{1}{25}\sin 5\omega t - \cdots\right]$$



$$F = \frac{8A}{\pi^2}\left[\cos\omega t + \frac{1}{9}\cos 3\omega t + \frac{1}{25}\cos 5\omega t + \cdots\right]$$

4. Trapez $\qquad \alpha = a\frac{2\pi}{T} = a\omega$

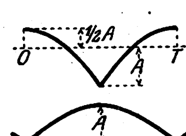


$$F = \frac{4A}{\pi\alpha}\left[\sin\alpha\sin\omega t + \frac{1}{9}\sin 3\alpha\sin 3\omega t + \cdots\right]$$

5. Parabelbogen

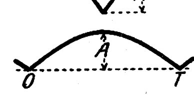


$$F = \frac{4A}{\pi^2}\left[\frac{\pi^2}{6} - \cos\omega t - \frac{1}{4}\cos 2\omega t - \frac{1}{9}\cos 3\omega t - \cdots\right]$$



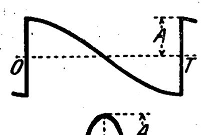
$$F = \frac{6A}{\pi^2}\left[\cos\omega t - \frac{1}{4}\cos 2\omega t + \frac{1}{9}\cos 3\omega t - \cdots\right]$$

6. Kommutierte Sinuslinie



$$F = \frac{2A}{\pi}\left[1 - \frac{2\cos\omega t}{1\cdot 3} - \frac{2\cos 2\omega t}{3\cdot 5} - \frac{2\cos 3\omega t}{5\cdot 7} - \cdots\right]$$

7. Kommutierte Cosinuslinie



$$F = \frac{8A}{\pi}\left[\frac{1}{1\cdot 3}\sin\omega t + \frac{2}{3\cdot 5}\sin 2\omega t + \frac{3}{5\cdot 7}\sin 3\omega t + \cdots\right]$$

8. Lichtbogenschwingung 2. Art $\qquad a = (1-\alpha)\,T$

$$F = A_0 + A_1\cos\omega t + A_2\cos 2\omega t + \cdots \qquad A_0 = \frac{2(1-\alpha)}{\pi}A$$

$$A_k = \frac{4A}{\pi}\cdot\frac{1-\alpha}{1-4k^2(1-\alpha)^2}\cos\alpha k\pi$$

Abb. 27a bis m.

9. Reihenentwicklungen von Kurven, die sich aus Bögen von H y p e r b e l f u n k t i o n e n zusammensetzen, findet man bei L. D r e y f u s, Archiv f. Elektrot. Bd. 7, 1919, S. 388.

Ein einfaches Rechenschema zur Bestimmung der ersten zwölf Koeffizienten ($r=24$) ist von C. R u n g e angegeben worden (ETZ 1905, S. 247). Hat man öfter derartige Berechnungen auszuführen, so bedient man sich zweckmäßig des von C. R u n g e und F. E m d e herausgegebenen Formulars (zu beziehen von F. Vieweg & Sohn), welches die Rechnungen nebst Probe vollkommen schematisch auszuführen gestattet.

Weitere Verfahren s. (216).

(108) Polardiagramm der Wechselstromgrößen.

1. Eine EMK oder ein Strom, der sich als Sinusfunktion der Zeit ansehen läßt (105), kann dargestellt werden durch die Projektionen eines Strahles, der sich um seinen Endpunkt dreht. Ist $E = E_0 \sin \omega t$, so bedeutet E_0 die Länge des Strahles, ω die Geschwindigkeit, mit der er sich dreht. Die Drehrichtung und den Strahl, von dem aus der Winkel gerechnet wird, kann man willkürlich festsetzen. Die Internationale Elektrotechnische Kommission hat 1911 festgesetzt: Bei der graphischen Darstellung periodisch veränderlicher elektrischer oder magnetischer Größen wird die Phasenvoreilung durch die der Uhrzeigerdrehung entgegengesetzte Richtung dargestellt. In den folgenden Beispielen ist außerdem angenommen, daß der Anfangsstrahl wagerecht nach rechts liegt. Vgl. Abb. 28a. OD = Anfangsstrahl, der Pfeil unter C gibt die Drehrichtung.

Abb. 28a. Selbstinduktivität in Reihe mit einem Widerstand.

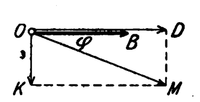


Abb. 28b. Kapazität in Reihe mit einem Widerstand.

Noch zweckmäßiger ist es, sich die die EMK und Ströme darstellenden Strahlen als ruhend und eine Zeitlinie als rotierend zu denken mit einer Drehrichtung wie der Uhrzeiger. Die Momentanwerte sind die Projektionen der Strahlen auf diese Zeitlinie. Vgl. Abb. 28a, der Strahl T ist die Zeitlinie.

2. Nach vorstehendem kann man jeder sinusförmig veränderlichen Größe (Spannung oder Stromstärke) einen Strahl in der Zeichenebene zuordnen. Die Länge des Strahls gibt die Amplitude der sinusförmig veränderlichen Größe, sein Winkel φ mit dem Anfangsstrahl bestimmt die Phasenverschiebung der betrachteten Größe gegen die dem Anfangsstrahl entsprechende Sinusgröße. Die den sinusförmig veränderlichen Größen zugeordneten Strahlen nennt man ihre D i a g r a m m v e k t o r e n[1]; diese bilden in ihrer Gesamtheit das V e k t o r d i a g r a m m.

3. Die EMK der Selbstinduktion ist um 90° hinter der Stromstärke zurück. Bedeutet (Abb. 28a) OB den Strom I, OD die Spannung IR, so ist $OC = \omega L I$; OD ist zugleich der Teil der äußeren EMK, der zur Hervorbringung des Stromes I im Widerstande R dient, während $OF = -OC$ der Teil der äußeren EMK ist, der zur Überwindung der Selbstinduktion dient; dieser Teil liegt um 90° v o r dem Strome; die gesamte äußere EMK ist demnach $= OG$. Die Beziehungen $\operatorname{tg} \varphi = \omega L/R$ und $I = E/\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ können aus dem Diagramm abgelesen werden.

---

[1] Nicht mit den physikalischen Vektoren ($\mathfrak{E}$, $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$ u. a.) zu verwechseln, die einen von der Richtung i m R a u m abhängigen physikalischen Zustand, nicht eine z e i t l i c h e Änderung veranschaulichen.

In Abb. 28b ist wieder OB der Strom, OD die Spannung IR, OK die Spannung an einem hinter R geschalteten Kondensator C, nämlich $\frac{I}{C\omega}$; OM ist die gesamte äußere EMK; $\operatorname{tg}\varphi = -\frac{1}{\omega C R}$; ferner

$$I = E \Big/ \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

4. Bei Hintereinanderschaltung von Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität hat man eine einfache Dreieckkonstruktion; wagerecht nach rechts wird das Produkt des Stromes mit der Summe aller Widerstände aufgetragen, die senkrechte Kathete ist $= I\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$, wobei der positive Wert nach oben gerichtet ist. Die Hypotenuse ist die Gesamtspannung nach Größe und Richtung.

5. Ist zu Widerstand und Selbstinduktion eine Kapazität parallel geschaltet, so wird über der Spannung zwischen den Verzweigungspunkten als Durchmesser OA (Abb. 29a) ein Kreis geschlagen. $OB = I_1 R$ und $AB = I_1 \omega L$ sind die Komponenten der Spannung für den Zweig mit Selbstinduktion und Widerstand; $OI_1 = I_1$ ist die Stromstärke in diesem Zweige. Da der andere Zweig keinen Widerstand enthält, so ist $OA = I_2/\omega C$. Der Ladestrom I_2 für den Kondensator muß dieser Spannung um 90° vorauseilen; also $I_2 = OI_2$; der Gesamtstrom OI setzt sich aus den Komponenten OI_1 und OI_2 zusammen. Verlängert man OI bis zum Schnittpunkte C mit dem Kreise, so ist OC gleich dem Produkt aus I und dem wirksamen Gesamtwiderstand zwischen den Verzweigungspunkten, also $OI \times OC$ der Energieverbrauch.

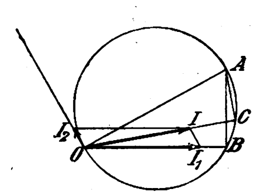


Abb. 29a. Drosselspule (Selbstinduktivität mit Widerstand) parallel zu einem Kondensator.

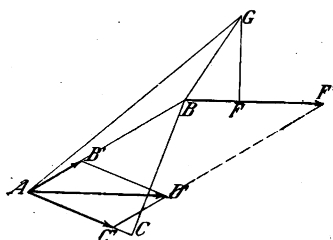


Abb. 29b. Mehrfach zusammengesetzter Stromkreis.

6. Hinter eine Stromschleife, von der ein Zweig aus einer Selbstinduktion L_1 und dem Widerstand R_1, der andere aus einem induktionslosen Widerstand R_2 besteht, sei eine Selbstinduktion L vom Widerstande R geschaltet. Sind i_1, i_2, I bzw. die Stromstärken in den drei Zweigen, so zeichne man zunächst ein rechtwinkliges Dreieck ABC (Abb. 29b), so daß die Katheten $BC : CA = \omega L_1 : R_1$, dann kann $AC = i_1 R_1$, $BC = \omega L_1 i_1$ gesetzt werden; da AB die Spannung an den Enden der Stromschleife ist, so ist gleichzeitig $AB = i_2 R_2$. Man mache $AB' = AB : R_2 = i_2$ und $AC' = AC : R_1 = i_1$, so ist die Resultante AD' gleich der Stromstärke I in R. Zieht man also BF' parallel und gleich AD' und macht $BF = BF' \cdot R$, und $FG = \omega L \cdot BF'$, so ist BG die Spannung an der Selbstinduktion L und somit AG die Gesamtspannung.

(109) Wirk- und Blindgrößen. Ist E die effektive Spannung zwischen den Enden eines Stromzweiges, I der darin fließende effektive Strom, N die im Zweig verbrauchte Leistung, so nennt man

$R_s = E/I$ den Scheinwiderstand des Zweiges,
$R_w = N/I^2$ den Wirkwiderstand des Zweiges,
$R_b = \sqrt{R_s^2 - R_w^2}$ den Blindwiderstand des Zweiges,
$G_s = I/E$ den Scheinleitwert des Zweiges,
$G_w = N/E^2$ den Wirkleitwert des Zweiges,
$G_b = \sqrt{G_s^2 - G_w^2}$ den Blindleitwert des Zweiges,
$E_w = N/I$ die Wirkspannung am Zweige,
$E_b = \sqrt{E^2 - E_w^2}$ die Blindspannung am Zweige,
$I_w = N/E$ den Wirkstrom im Zweige,
$I_b = \sqrt{I^2 - I_w^2}$ den Blindstrom im Zweige,
$N_s = EI$ die Scheinleistung im Zweige,
$N_b = \sqrt{(EI)^2 - N^2}$ die Blindleistung im Zweige,
$F = N/EI$ den Leistungsfaktor,
$B = N_b/EI$ den Blindfaktor.

Die Anwendung dieser Begriffe auf die in (108) betrachteten Beispiele ergibt folgendes.

In Abb. 28a ist OD die Wirkspannung, DG die Blindspannung an der Spule.

In Abb. 28b ist OD die Wirkspannung, DM die Blindspannung.

In Abb. 29a ist OB die Wirkspannung, AB die Blindspannung an der Spule, dagegen OC die Wirkspannung, AC die Blindspannung an der gesamten Anordnung. Man sieht, daß durch das Parallelschalten des Kondensators zur Spule die Blindspannung (und auch die Blindleistung) herabgesetzt wird.

Während die Leistung den Energieverbrauch darstellt, entspricht die Blindleistung einem Hin- und Herpendeln von Energie zwischen dem betrachteten Stromzweig und dem übrigen Teil des Stromkreises. Dieses Pendeln hat man sich so vorzustellen, daß die Energie in den Energiespeichern des Zweiges (als magnetische Energie in den Drosseln, als elektrische Energie in den Kondensatoren, als kinetische Energie in trägen Massen, als potentielle Energie in gespannten Federn usw.) zeitweise aufgespeichert und dann wieder abgegeben wird.

(110) Komplexe Rechnung. Um von der Genauigkeit der Zeichnungen nicht abzuhängen, ist es häufig bequem, das Vektordiagramm in die Sprache der Algebra zu übersetzen. Ein Vektor I von der Amplitude I_0 und dem Phasenwinkel φ kann durch die komplexe Zahl

$$\mathfrak{J} = I_0 e^{i\varphi} = I_0 \cos\varphi + i I_0 \sin\varphi = a + b i$$

ausgedrückt werden, wenn man die Ebene des Vektordiagramms als Gaußische Zahlenebene auffaßt[1]). Für den Übergang von der zweiten Form auf die erste hat man die Formeln

$$I_0 = \sqrt{a^2 + b^2}; \qquad \operatorname{tg}\varphi = b/a.$$

Wegen der Ausführung solcher Zahlenrechnungen siehe (5).

Da der Differentialquotient einer Sinuskurve

$$d/dt\,[I_0 \sin(\omega t + \varphi)] = I_0 \omega \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$$

einen Vektor bedeutet, der dem Vektor $\mathfrak{J}$ um 90° voreilt, so wird er beim komplexen Rechnen durch die Zahl

---

[1]) Man ersieht hieraus, daß das darauf gegründete Rechnungsverfahren ebenso wie das Vektordiagramm nur auf bereits stationär gewordene oder eingeschwungene Wechselstromvorgänge anwendbar ist. Die Drehung des Vektordiagramms läßt sich durch den Faktor $e^{i\omega t}$ zum Ausdruck bringen, der einen Vektor bedeutet, der den Betrag 1 hat und sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω um den Nullpunkt dreht. Man wird das mit Vorteil dort tun, wo Vektoren von verschiedenen ω unterschieden werden sollen.



$$\omega I_0 e^{i(\varphi+\pi/2)} = i\omega I_0 e^{i\varphi} = i\omega\mathfrak{J}$$

dargestellt. Daraus ergibt sich zum Beispiel:

1. die Spannung $\mathfrak{V}$ an einer Spule vom Widerstand r und der Selbstinduktivität L beim Strome $\mathfrak{J}$

$$\mathfrak{V} = (r + i\omega L)\mathfrak{J}; \quad V_0 = I_0\sqrt{r^2+\omega^2 L^2}; \quad \operatorname{tg}(\mathfrak{V}, \mathfrak{J}) = \omega L/r.$$

$\mathfrak{R} = r + i\omega L$ ist der Widerstandsoperator, $\sqrt{r^2+\omega^2 L^2} = |\mathfrak{R}|$ der Scheinwiderstand (die Impedanz) der Spule; ωL ist ihr Blindwiderstand.

2. Der Strom $\mathfrak{J}$ durch eine an der Spannung $\mathfrak{V}$ liegende Parallelschaltung aus der Kapazität C und dem Widerstand r

$$\mathfrak{J} = \left(\frac{1}{r} + i\omega C\right)\mathfrak{V};$$

$$I_0 = V_0\sqrt{r^{-2}+\omega^2 C^2}; \qquad \operatorname{tg}(\mathfrak{J}, \mathfrak{V}) = r\omega C.$$

$1/i\omega C$ ist der Widerstandsoperator, $i\omega C$ der Leitwertsoperator der Kapazität C; $1/\omega C$ ihr Scheinwiderstand, ωC ihr Scheinleitwert. $1/r + i\omega C$ ist der Leitwertsoperator der Verbindung r neben C.

3. Der Strom $\mathfrak{J}$ durch eine Reihe aus dem Widerstand r, der Induktivität L, der Kapazität C bei der Spannung $\mathfrak{V}$ berechnet sich aus

$$\mathfrak{V} = \mathfrak{J}(r + i\omega L + 1/i\omega C);$$

$$V_0 = I_0\sqrt{r^2 + \left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; \quad \operatorname{tg}(\mathfrak{V}, \mathfrak{J}) = \frac{L\omega - 1/\omega C}{r}.$$

4. Durch fortgesetzte Anwendung dieser Regeln können die Stromverhältnisse in jedem aus Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten beliebig zusammengeschalteten Kreise berechnet werden.

5. Die Leistung des Stromes $\mathfrak{J} = a + ib$ mit der Spannung $\mathfrak{V} = c + id$ beträgt $N = ac + bd$, die Blindleistung $N_b = |ad - bc|$. Diese Ausdrücke lehren, daß man zur Berechnung der Leistungsgrößen entweder den komplexen Strom $\mathfrak{J}$ mit der konjugiert komplexen Spannung $k(\mathfrak{V}) = c - id$ multiplizieren muß, oder die komplexe Spannung $\mathfrak{V}$ mit dem konjugiert komplexen Strom $k(\mathfrak{J})$. Und zwar ist

N = Reeller Teil von $\mathfrak{J}k(\mathfrak{V})$ oder von $\mathfrak{V}k(\mathfrak{J})$,

N_b = Betrag des imaginären Teils von $\mathfrak{J}k(\mathfrak{V})$ oder von $\mathfrak{V}k(\mathfrak{J})$.

6. Zusammenfassung. Der große Vorteil des komplexen Rechnungsverfahrens ist hiernach, daß jedes auf stationäre Wechselströme bezügliche Problem im wesentlichen auf ein Gleichstromproblem zurückgeführt wird; nur hat man an Stelle der Ohmschen Widerstände oder Leitwerte überall die komplexen Operatoren. Es ist meistens nützlich, für diese zunächst einfache Buchstaben (wie oben $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{J}$ u. a.) zu setzen, und ihre besondere Bedeutung erst am Ende der Rechnung einzuführen. Erscheint das Schlußergebnis in der Form

$$\mathfrak{J} = I_0 e^{i\varphi} = \frac{\alpha + \beta i}{\gamma + \delta i}, \text{ so folgt } I_0 = \sqrt{\frac{\alpha^2+\beta^2}{\gamma^2+\delta^2}}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\beta\gamma - \alpha\delta}{\alpha\gamma + \beta\delta}.$$

(111) Allgemeine Gleichungen des Wechselstromkreises. Führt man einem beliebig zusammengesetzten Wechselstromkreise an irgendeiner Stelle bei der Spannung $\mathfrak{V}_a$ den Strom $\mathfrak{J}_a$ zu und entnimmt dem Kreise an irgendeiner anderen Stelle bei der Spannung $\mathfrak{V}_e$ den Strom $\mathfrak{J}_e$, so bestehen zwischen den Spannungen und Strömen lineare Gleichungen[1]), die man in der Form

[1]) A. Franke, ETZ 1891, S. 461.

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{V}_a &= \mathfrak{A}_1 \mathfrak{V}_e + \mathfrak{B}\,\mathfrak{J}_e \\ \mathfrak{J}_a &= \mathfrak{A}_2 \mathfrak{J}_e + \mathfrak{C}\,\mathfrak{V}_e\end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

schreiben kann. Die komplexen Konstanten $\mathfrak{A}_1$, $\mathfrak{A}_2$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ sind durch die elektrischen Konstanten des Stromkreises und durch die Betriebsfrequenz bestimmt. Zwischen ihnen besteht ferner die Gleichung

$$\mathfrak{A}_1 \mathfrak{A}_2 - \mathfrak{B}\,\mathfrak{C} = 1 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Vertauscht man die Stromzuführungsstelle mit der Stromabnahmestelle, so kehren sich die Stromrichtungen um, d. h. $\mathfrak{J}_a$ geht in $-\mathfrak{J}_a$, $\mathfrak{J}_e$ in $-\mathfrak{J}_e$ über; die Gleichungen lauten alsdann, nach $\mathfrak{V}_e$ und $\mathfrak{J}_e$ aufgelöst,

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{V}_e &= \mathfrak{A}_2 \mathfrak{V}_a + \mathfrak{B}\,\mathfrak{J}_a \\ \mathfrak{J}_e &= \mathfrak{A}_1 \mathfrak{J}_a + \mathfrak{C}\,\mathfrak{V}_a\end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

Die Konstanten $\mathfrak{A}_1$, $\mathfrak{A}_2$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ sind durch einfache Leerlaufs- und Kurzschlußmessungen zu bestimmen. Führt man den Strom bei a zu, so wird nach Gl. (1)

der Leerlaufswiderstand $(\mathfrak{J}_e = 0)$ $\quad \mathfrak{U}_{1a} = \dfrac{\mathfrak{A}_1}{\mathfrak{C}}$,

der Kurzschlußwiderstand $(\mathfrak{V}_e = 0)$ $\quad \mathfrak{U}_{2a} = \dfrac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{A}_2}$.

Wird der Strom bei b zugeführt, so ergibt sich aus Gl. (3)

der Leerlaufswiderstand $(\mathfrak{J}_a = 0)$ $\quad \mathfrak{U}_{1e} = \dfrac{\mathfrak{A}_2}{\mathfrak{C}}$,

der Kurzschlußwiderstand $(\mathfrak{V}_a = 0)$ $\quad \mathfrak{U}_{2e} = \dfrac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{A}_1}$.

Eine Probe auf die Richtigkeit der Messung ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{\mathfrak{U}_{1a}}{\mathfrak{U}_{2a}} = \frac{\mathfrak{U}_{1e}}{\mathfrak{U}_{2e}}.$$

Hat man die Leerlaufs- und Kurzschlußwiderstände gemessen, so kann man unter Zuhilfenahme der Gl. (2) die Konstanten $\mathfrak{A}_1$, $\mathfrak{A}_2$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ des Kreises berechnen. (Näheres bei J. L. la Cour, Leerlauf- und Kurzschlußversuch in Theorie und Praxis, Braunschweig 1904.)

(112) Die Strömungsvorgänge in einigen wichtigen Stromkreisen einfacher Art. 1. Induktionsspule vom Widerstand R und der Selbstinduktivität L an einer EMK, die das Zeitgesetz $E = \mathrm{f}(t)$ befolgt. Der Strom gehorcht der Differentialgleichung (97):

$$E = \mathrm{f}(t) = RI + L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

Wenn zur Zeit $t = 0$ der Strom $= I_0$ sein soll, so wird

$$I = \frac{1}{L}\int_0^t e^{\frac{\vartheta - t}{T}} \mathrm{f}(\vartheta)\,\mathrm{d}\vartheta + I_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

$T = L/R$ ist die Zeitkonstante der Spule. Schaltet man z. B. eine Spule mit einer Gleichspannung $\mathrm{f}(t) = E = \text{const.}$ ein $(I_0 = 0)$, so folgt durch Ausführung der Integration:

$$I = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Der Strom erreicht also seinen stationären oder Endwert E/R nicht sogleich; an diesem fehlen noch b% nach der Zeit T log nat $(100/b)$. Z. B. fehlen zu den Zeiten t

$=$	T	$2T$	$3T$	$4T$	$5T$	$6T$
noch	36,8	13,5	5,0	1,8	0,7	0,2%.

Beim Einschalten einer Wechselspannung $E = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ wird

$$I = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t + \varphi - \psi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \psi) \right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \omega T = \omega L/R.$$

Die Stromkurve ist hiernach in der ersten Zeit nach dem Einschalten nicht sinusförmig; erst wenn das zweite Glied unmerklich geworden ist, ergibt sich der stationäre oder eingeschwungene Stromverlauf.

In Spulen mit hochgesättigtem Eisenkern werden die Stromstöße beim Einschalten sehr stark. Für diesen Fall schreibt man die Differentialgleichung besser in der Form

$$E = E_0 \sin \omega t = R I + \frac{d\Phi}{dt}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

wo $\Phi = LI$ den mit der Spule verketteten Induktionsfluß bedeutet. Der Zusammenhang von Φ und I ist durch die Magnetisierungskurve OP_1P_2 (Abb. 30) gegeben; L ist daher keine Konstante mehr. Vernachlässigt man in erster Näherung den Ohmschen Spannungsfall RI, so ist die Lösung von (4) für den Beharrungszustand

$$\Phi = -\Phi_0 \cos \omega t \quad \text{mit} \quad \Phi_0 = \frac{E_0}{\omega} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Zu dem Fluß Φ_0 gehört der normale Magnetisierungsstrom I_0 (Abb. 30). Der durch Gl. (5) beschriebene Beharrungszustand kann sich aber nicht ohne weiteres einstellen, wenn man in dem Zeitpunkt einschaltet, in dem die Wechselspannung E durch Null geht ($t = 0$). Hier müßte $\Phi = -\Phi_0$ sein, während tatsächlich die Spule noch kein Magnetfeld enthält. Mit der Anfangsbedingung $\Phi = 0$ für $t = 0$ lautet die Lösung der Differentialgleichung:

$$\Phi = \Phi_0 (1 - \cos \omega t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Das Feld schwingt also nicht um den Nullwert, sondern um den Wert Φ_0 und erreicht infolgedessen nach einer halben Periode den Maximalwert $\Phi_M = 2\Phi_0$. Zu ihm gehört nach der Magnetisierungskurve (Abb. 30) ein Stromwert I_M, der den normalen Magnetisierungsstrom um ein Vielfaches übersteigt (in der Größenordnung des Hundertfachen bei Transformatoren mit Kernen aus hochlegiertem Eisenblech).

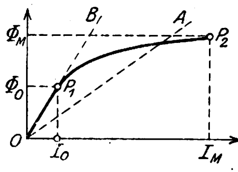


Abb. 30. Magnetisierungsstrom einer Drossel.

Zur genaueren Bestimmung von I_M darf man den Ohmschen Spannungsfall nicht vernachlässigen; schon durch verhältnismäßig bescheidene Werte von IR wird I_M stark herabgesetzt. Nach Rüdenberg kann man den Widerstandswert, der nötig ist, um den größten Stromstoß nicht über das n-fache des Magnetisierungsstromes wachsen zu lassen, folgendermaßen ermitteln. Aus der Magnetisierungskurve ergibt sich der zu $I_M = nI_0$ gehörige Maximalwert des Feldes $\Phi_M = m\Phi_0$. Dann berechne man die Größe

$$r = \frac{m}{n\pi} \log \text{nat} \frac{1}{m-1}.$$

Sie bedeutet den im gesuchten Widerstand von dem (bekannten) Strome I_0 hervorgebrachten Spannungsfall, ausgedrückt in Teilen der Betriebsspannung: $r = I_0 R/E_0$. Somit ist $R = r E_0/I_0$. Zwecks Begrenzung des Einschaltstromstoßes schaltet man größere Transformatoren, Asynchronmotoren und Asynchrongeneratoren mittels Schutzschalters (Schalter mit Vorkontakt und Widerstandsstufe) ein (W. Linke, Arch. f. Elektrot. Bd. 1, 1912, S. 16, 69).

Verfahren zur Zeichnung der Stromkurven beim Einschalten von Spulen mit Eisenkern sind von A. Hay[1]) und A. Schwaiger[2]) angegeben worden.

Wird die Spule mit dem Strom I_0 im Moment $t=0$ plötzlich kurzgeschlossen ($f(t)=0$), so verklingt der Strom nach dem Gesetz

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (7)$$

Wird der Strom durch Abschalten der Stromquelle nach dem Gesetz $I = I_0(1 - t/\tau)$ auf null gebracht, so entwickelt die Spule während der Unterbrechungszeit τ die EMK $E = L\, I_0/\tau$. Zur Verhütung gefährlicher Spannungen beim Abschalten von Spulen verwendet man u. a. folgende Mittel. a) Man schaltet der Spule einen Kondensator, einen kleinen Nebenschlußmotor, einen Widerstand oder eine Reihe Zersetzungszellen parallel; b) man versieht sie mit einer kurzgeschlossenen „Dämpferwicklung"[3]) (s. u. 113b, Beisp. 3); c) vor dem Abschalten wird eine entmagnetisierende Wicklung hinzugeschaltet.

2. Kapazität C und Widerstand R in Reihe an der Spannung $E = f(t)$. Die Spannung v am Kondensator ist aus der Differentialgleichung

$$f(t) = v + RI = v + RC\frac{dv}{dt} = v + T\frac{dv}{dt} \quad (8)$$

zu bestimmen. $T = RC$ ist die Zeitkonstante dieses Stromkreises. Es ergibt sich

$$v = \frac{1}{T}\int_0^t e^{\frac{\vartheta - t}{T}} f(\vartheta)\, d\vartheta + v_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

v_0 = Spannung im Moment $t=0$. Für das Einschalten des ungeladenen Kondensators ($v_0 = 0$) erhält man

a) bei der Gleichspannung $f(t) = E$ = konst.

$$v = E\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (9)$$

Der Ladestrom $I = C\, dv/dt$ wird

$$I = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (10)$$

b) Bei der Wechselspannung $f(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$

$$v = \frac{E_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}\left[\sin(\omega t + \varphi - \psi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \psi)\right], \quad (11)$$

$$\operatorname{tg}\psi = \omega T = \omega C R.$$

$$I = \frac{E_0 C \omega}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}\left[\cos(\omega t + \varphi - \psi) + \frac{1}{\omega T} e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \psi)\right]. \quad (12)$$

---

[1]) The Electrical Review 1898, Bd. 43, S. 326.

[2]) Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1909, S. 633, 658.

[3]) Wegen der Wirkungsweise und zweckmäßigen Bemessung siehe K. W. Wagner, Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1909, Heft 35, 36.

3. Induktivität L, Kapazität C, Widerstand R in Reihe an der Spannung $f(t)$. Für den Strom I gilt

$$f(t) = L\, dI/dt + RI + \int I\, dt/C$$

oder

$$q(t) = f'(t)/L = I'' + I'\, R/L + I/LC.$$

Wenn keine äußere Spannung wirkt ($f(t) = 0$, $q(t) = 0$), wie etwa bei der Entladung von C über R und L, so erscheint I in der Form

$$I = e^{-\alpha t}(A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t) \quad \ldots \ldots \ldots \quad (13)$$

(freie Schwingung). $\alpha = R/2L =$ Dämpfungsexponent;

$$\omega_0 = \sqrt{(1/LC) - \alpha^2}$$

ist die 2πfache Eigenfrequenz des Kreises. $2\pi\alpha/\omega_0 = \delta$ ist gleich dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses zweier aufeinanderfolgenden gleichsinnigen Amplituden und heißt daher das logarithmische Dekrement der Schwingung.

Mit zunehmendem Dämpfungsexponent α wird die Eigenfrequenz niedriger. Ist $LC\alpha^2 = R^2C/4L \geqq 1$, so wird $\omega_0 = 0$, bzw. imaginär; das heißt, an Stelle der Schwingung tritt ein aperiodischer Abklingungsvorgang.

Für eine aufgedrückte Spannung $f(t)$ wird

$$I = \frac{1}{L\omega_0}\int_0^t f'(\vartheta)\, e^{-\alpha(t-\vartheta)} \sin \omega_0 (t-\vartheta)\, d\vartheta +$$

$$+ \frac{I'(0) + \alpha I(0)}{\omega_0}\, e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t + I(0) e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t. \quad \ldots \quad (14)$$

$I(0)$, $I'(0)$ = Werte von I und dI/dt für $t = 0$.

Bei einer Wechselspannung $f(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ wird

$$I = E_0 \frac{R \sin(\omega t + \varphi) - (L\omega - 1/C\omega) \cos(\omega t + \varphi)}{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$$

$$- E_0 e^{-\alpha t} \frac{R \sin(-\omega_0 t + \varphi) - (L\omega - 1/C\omega) \cos(-\omega_0 t + \varphi)}{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$$

$$+ \frac{I'(0) + \alpha I(0)}{\omega_0}\, e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t + I(0)\, e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t. \quad \ldots \ldots \quad (15)$$

Das erste Glied stellt die erzwungene Schwingung, die übrigen drei stellen die freie Schwingung dar; diese verklingt bald nach dem Einschalten; der Wechselstrom ist alsdann stationär geworden (hat sich eingeschwungen). Für die Frequenz $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ wird der stationäre Strom ein Maximum; er liegt dann in Phase mit der Spannung: $I = (E_0/R) \sin(\omega t + \varphi)$. Die Resonanzfrequenz ω_r stimmt mit der Eigenfrequenz nicht genau überein ($\omega_0^2 = \omega_r^2 - \alpha^2$); der Unterschied ist jedoch praktisch zumeist verschwindend.

Eigentümliche Resonanzerscheinungen treten ein, wenn die Drosselspule einen geschlossenen Eisenkern hat, so daß L nicht konstant ist, sondern stark vom Strome abhängt. Ein Kreis mit einer derartigen Spule hat überhaupt keine eigentliche Resonanzfrequenz; dafür gibt es einen Frequenzbereich, in dem der aufgenommene Strom davon abhängt, welche Stromstärke und Frequenz vorher auf den Kreis eingewirkt hat. (O. Martienssen, ETZ 1910, S. 204; W. Petersen, ETZ 1915, S. 353,; 1916, S. 129; siehe auch die anschließende Erörterung ETZ 1916, S. 148 und S. 252.) Vgl. hierzu ferner G. Duffing, „Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung", Braunschweig 1918,

(113) Ausgleichsvorgänge. a) Allgemeines. Wirkt auf einen elektrischen Stromkreis eine zeitlich konstante oder eine periodisch veränderliche EMK, so stellt sich nach Ablauf einiger Zeit ein Zustand ein, bei dem im ersten Falle alle Spannungen und Ströme zeitlich konstant, im zweiten Falle alle Spannungen und Ströme periodisch veränderlich sind, und zwar mit der Periode der EMK. Dieser sogenannte „Beharrungszustand" kann sich aber im allgemeinen nicht sogleich nach dem Einschalten der EMK einstellen aus folgendem Grunde. Der Beharrungszustand erfordert in jedem Zeitpunkt eine bestimmte Verteilung der elektromagnetischen Energie W im Stromkreise, entsprechend den vorgeschriebenen Strömen I in den Spulen L und den vorgeschriebenen Spannungen V an den Kondensatoren C.

$$W = \sum \frac{1}{2} L I^2 + \sum \frac{1}{2} C V^2.$$

Da der Zustand des Stromkreises vor dem Einschalten der EMK von dem unter der Einwirkung der EMK eintretenden Beharrungszustand verschieden ist, wird auch die im Augenblick des Einschaltens noch bestehende Energieverteilung von der Energieverteilung im Beharrungszustand abweichen. Die Energieverteilung kann sich aber nicht plötzlich ändern, da eine plötzliche Energieänderung eine unendlich große Leistung bedingen würde. Da alle Leistungen endlich bleiben müssen, kann sich die Energie nur stetig ändern; d. h. der Beharrungszustand kann nicht sofort nach dem Einschalten, sondern nur allmählich eintreten.

Man kann nun den tatsächlichen Zustand nach dem Einschalten dadurch beschreiben, daß man sich den Beharrungszustand sofort eingetreten denkt, ihm jedoch einen „Ausgleichsvorgang" überlagert, der so beschaffen ist, daß er den stetigen Anschluß des Endzustandes an den Anfangszustand vermittelt. Sind V_a, I_a die Spannungen und Ströme des Anfangszustandes, V_e, I_e dieselben Größen im Beharrungszustande und V_f, I_f diese Größen für den Ausgleichsvorgang, so muß zunächst im Einschaltmoment $t=0$ an jedem Kondensator

$$V_a = V_e + V_f, \qquad (1a)$$

und in jeder Spule

$$I_a = I_e + I_f \qquad (1b)$$

sein. Ist ferner E die (konstante oder periodisch veränderliche) EMK, so liefern die Gesetze des Stromkreises eine oder mehrere lineare Beziehungen von der Form

$$E = \Psi(V_e + V_f,\ I_e + I_f). \qquad (2)$$

Ψ enthält auch Ableitungen nach der Zeit; die vorstehende Gleichung ist somit als Differentialgleichung aufzufassen. Sie gilt auch noch für den Beharrungszustand:

$$E = \Psi(V_e,\ I_e). \qquad (3)$$

Da nun die Gleichungen linear sind, so folgt durch Differenzbildung

$$0 = \Psi(V_f,\ I_f). \qquad (4)$$

Diese Gleichung lehrt die Ausgleichsspannungen und die Ausgleichsströme berechnen; sie zeigt, daß der Ausgleichsvorgang in seinem Ablaufe von der Art und Größe der EMK völlig unabhängig ist. Man nennt deshalb die Ausgleichsspannungen und -ströme auch „freie" Spannungen und Ströme und den Ausgleichsvorgang einen „freien" Vorgang. Da er nicht von einer EMK aufrechterhalten wird, muß sich sein Energievorrat allmählich erschöpfen, d. h. die V_f und I_f müssen im Laufe der Zeit verklingen, so daß in der Tat zuletzt nur der Beharrungszustand übrig bleibt.

b) Beispiele.

1. Für den Fall der Spule (112, 1) entspricht die Gleichung

$$E = R I + L \frac{dI}{dt}$$

unserer Gl. (2). Daher lautet die Gleichung zur Berechnung des Ausgleichsstromes (Gl. 4)

$$0 = R I_f + L \frac{d I_f}{d t}.$$

Ihre Lösung ist

$$I_f = I_f(0) e^{-\frac{t}{T}}.$$

$I_f(0)$ ist der Anfangswert des Ausgleichsstromes.

Beim Einschalten der vorher stromlosen Spule muß er den Beharrungsstrom gerade aufheben. Dies ergibt für den Fall einer konstanten EMK den Wert

$$I_f(0) = -\frac{E}{R},$$

und den Gesamtstrom als Summe des Ausgleichsstromes und des Beharrungsstromes

$$I = I_f + \frac{E}{R} = \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

wie in (112), Gl. (2) angegeben.

Für das Einschalten einer Wechsel-EMK drückt Gl. (3) in (112) die Lösung aus; das erste Glied in der Klammer entspricht dem Beharrungsstrom, das zweite Glied dem Ausgleichsstrom.

2. Beim Stromkreis mit Induktivität, Kapazität und Widerstand ist der Ausgleichsvorgang die freie Schwingung (Gl. 13 in 112).

3. Bemerkenswert ist auch der Ausgleichsvorgang in einem Gebilde aus zwei magnetisch miteinander verketteten Kreisen (allgemeiner Transformator) (Abb. 31). Die Gleichungen dieser Anordnung sind (97)

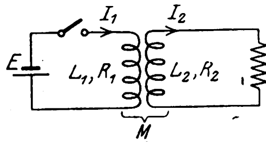


Abb. 31. Zwei magnetisch verkettete Kreise.

$$E = R_1 I_1 + L_1 \frac{d I_1}{d t} + M \frac{d I_2}{d t},$$

$$0 = R_2 I_2 + L_2 \frac{d I_2}{d t} + M \frac{d I_1}{d t}.$$

Mit $E = 0$ ergeben diese Gleichungen die Ausgleichsströme. Wir führen die folgenden Begriffe ein: $T_1 = L_1/R_1$ und $T_2 = L_2/R_2$ seien die Zeitkonstanten der beiden Kreise für sich; ferner ist

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

die Streuziffer. Endlich bedeutet $I_\mu = I_1 + \frac{M}{L_1} I_2$ den auf den Primärkreis bezogenen Magnetisierungsstrom. Dann regelt sich der Verlauf der Ausgleichsströme nach den folgenden Gesetzen[1]):

$$I_1 = I_\mu(0) \frac{T_1}{T_1 + T_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}},$$

$$\frac{M}{L_1} I_2 = I_\mu(0) \frac{T_2}{T_1 + T_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}},$$

[1]) Diese Beziehungen sind nicht vollkommen streng; sie gelten um so genauer, je enger die Kreise miteinander verkettet sind, d. h. je kleiner σ ist. Vgl. K. W. Wagner, Elektrot. u. Maschb., Wien 1909, S. 804, 829.

d. h. in jeder der beiden Wicklungen setzt sich der Ausgleichsstrom aus zwei Teilen zusammen; der eine verklingt nach einem Exponentialgesetze mit der Zeitkonstante τ_1, der andere mit der Zeitkonstante τ_2. Dabei ist

$$\tau_1 = T_1 + T_2; \qquad \tau_2 = \sigma \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}.$$

Bei enger magnetischer Verkettung, also geringer Streuung (σ klein) ist τ_2 viel kleiner als τ_1; der eine Teil des Ausgleichsstromes verklingt demnach viel schneller als der andere.

Der langsame Ausgleichsvorgang entspricht dem Energieausgleich des Hauptfeldes, der schnelle Ausgleichsvorgang dem Energieausgleich des Streufeldes. In welcher Stärke die beiden Vorgänge auftreten, richtet sich nach den Anfangsbedingungen (Gl. 1 b). Diese ergeben für die freien Ströme die Werte $I_1(0)$ und $I_2(0)$; danach berechnen sich die Konstanten $I_\mu(0)$ und A_2 aus

Abb. 32. Anstieg des Stromes beim Einschalten einer Magnetspule mit Dämpferwicklung.

$$I_\mu(0) = I_1(0) + \frac{M}{L_1} I_2(0);$$

$$A_2 = \frac{T_2 I_1(0) - T_1 \frac{M}{L_1} I_2(0)}{T_1 + T_2}.$$

Für den Fall des Einschaltens einer Gleichstrom-Magnetspule mit Dämpferwicklung wird $E = \text{const.}$, $I_1(0) = -\frac{E}{R_1}$, $I_2(0) = 0$. Der Anstieg des Stromes in der Spule ist in Abb. 32 dargestellt.

(114) Die Regel von Heaviside. Es liege ein mechanisches oder elektromagnetisches System mit beliebig vielen Freiheitsgraden (Koordinaten) vor. Das System befinde sich zunächst im Gleichgewichte. In einem bestimmten Zeitpunkt ($t = 0$) werde das Gleichgewicht plötzlich dadurch gestört, daß an irgendeiner Stelle P des Systems eine eingeprägte Kraft K (z. B. eine EMK) zu wirken beginnt (etwa infolge eines Schaltvorganges). Die Kraft K möge weiterhin ($t > 0$) konstant bleiben. Unter ihrer Wirkung wird das System einem neuen Gleichgewichtszustand zustreben. Gefragt ist, wie das vor sich geht. Die Frage kann als beantwortet gelten, wenn man für jede veränderliche Systemgröße S (Strom, Spannung usw.) den zeitlichen Verlauf, d. h. die Funktion $S(t)$ von $t = 0$ bis ∞ angeben kann. Bezüglich des Systems wird natürlich vorausgesetzt, daß die Systemgrößen durch lineare Beziehungen miteinander verknüpft sind, z. B. durch lineare Differential- oder Differenzengleichungen.

Heaviside[1]) gibt folgende Regel an. Man denke sich zunächst das System in einer erzwungenen Bewegung, bei der alle Systemgrößen das Zeitgesetz konst. e^{pt} befolgen. Diese Bewegung soll dadurch zustande kommen, daß an der Stelle P eine eingeprägte Kraft von der Größe e^{pt} tätig ist. Unter der Wirkung dieser besonderen Kraft wird die gesuchte Systemgröße den Wert

$$S_p = \frac{e^{pt}}{Z}$$

[1]) Electromagnetic Theory, Bd. 2, London 1899, S. 127.

annehmen. Z ist eine Funktion von p, die sich dadurch ergibt, daß man in die Systemgleichungen für die einzelnen veränderlichen Größen Ausdrücke der Form konst. e^{pt} einführt und alle Größen bis auf die gesuchte Größe S eliminiert. Z heiße die „Stammfunktion“ von S.

Man bestimme nunmehr die Wurzeln der „Stammgleichung“

$$Z = 0.$$

Sie seien mit

$$p_1, \; p_2, \; p_3, \; \ldots p_n \ldots$$

bezeichnet. Es sind die sogenannten „Eigenwerte“ des Systems. Dann gibt der Ausdruck

$$S = \frac{K}{Z(0)} + K \sum_n \frac{e^{p_n t}}{p_n Z'(p_n)} \qquad (1)$$

den gesuchten zeitlichen Verlauf der Systemgröße S unter der Einwirkung einer an der Stelle P im Zeitpunkt $t=0$ plötzlich auftretenden, dann konstant bleibenden Kraft K an. $Z(0)$ ist der Wert von Z für $p=0$; Z' die Ableitung (der Differentialquotient) von Z nach p.

Die Eigenwerte p_n sind im allgemeinen komplex von der Form $p_n = -\alpha_n \pm i\omega_n$; das Glied mit $e^{p_n t}$ bedeutet alsdann eine gedämpfte Eigenschwingung mit dem Dämpfungsexponenten α_n und der Kreisfrequenz ω_n.

Beispiele für die Anwendung der Heavisideschen Regel gibt K. W. Wagner im Arch. f. Elektrot. Bd. 4, 1915, S. 159 ff. Dort ist auch angegeben, wie die Entwicklung umzuformen ist, wenn mehrere Eigenwerte einander gleich werden, so daß $Z'(p_n) = 0$ wird.

Die Heavisidesche Regel gilt auch für das Einschalten mit Wechselstrom, wo also die im Zeitpunkt $t=0$ plötzlich auftretende Kraft weiterhin das Zeitgesetz $K = K_0 e^{i\omega t}$ befolgt. In diesem Falle lautet die Entwicklung

$$S = \frac{K_0 e^{i\omega t}}{Z(i\omega)} + K_0 \sum_n \frac{e^{p_n t}}{(p_n - i\omega) Z'(p_n)} \qquad (2)$$

Das erste Glied auf der rechten Seite der Gl. (1) oder (2) ergibt den Beharrungszustand, das zweite den Ausgleichsvorgang.

(115) Spannungs- und Stromverteilung in Kabeln und Freileitungen. a. Allgemeines. Sind R, G, L, C die wirksamen Werte[1]) des Ohmschen Widerstandes, der Ableitung, der Selbstinduktivität, der Kapazität für die Längeneinheit, und bezeichnet I den Strom, V die Spannung (zwischen Hin- und Rückleitung) am Ort x zur Zeit t, so gilt

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = RI + L\frac{\partial I}{\partial t}; \qquad -\frac{\partial I}{\partial x} = GV + C\frac{\partial V}{\partial t}.$$

Wegen der Werte von C siehe (47), von L siehe (92). Die Ableitung oberirdischer Leitungen hängt vom Isolationszustand ab und bewegt sich in der Größenordnung von 0,1 bis 2,0 μS/km. Die Induktivität der Kabel beträgt etwa

bei Starkstromkabeln	0,4 mH/km
bei vieladrigen Fernsprech-Papierkabeln	0,7 mH/km
bei Fernsprechkabeln mit Eisendrahtbespinnung der Leiter nach Krarup	8 mH/km
bei Telegraphenkabeln mit Rückleitung durch die Erde	2,5 mH/km

---

[1]) Dießelhorst und Emde, ETZ 1909, S. 1155, 1184.

Die Ableitung von Kabeln ist vornehmlich durch die dielektrischen Verluste bestimmt (43) und aus Kapazität, Kreisfrequenz und dielektrischem Verlustwinkel nach der Formel

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta$$

zu berechnen.

b) Beharrungszustand bei Wechselstrom. Befindet sich die Leitung in einem Stromkreis, in dem eine EMK $E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ tätig ist, so wird nach einer Weile der Strom I und die Spannung V längs der ganzen Leitung ebenfalls sinusförmig sein:

$$V = V(x) \sin[\omega t + \varphi(x)]; \qquad I = I(x) \sin[\omega t + \psi(x)].$$

Die Amplituden $V(x)$, $I(x)$ und die Phasenwinkel $\varphi(x)$, $\psi(x)$ ändern sich von Punkt zu Punkt. Die Berechnung gestaltet sich am übersichtlichsten auf komplexem Wege (110), indem man die komplexen Spannungs- und Stromvektoren

$$\mathfrak{V}_x = V(x)\, e^{i\varphi(x)} \text{ und } \mathfrak{J}_x = I(x)\, e^{i\psi(x)}$$

einführt. Dann bestehen zwischen den Spannungen und Strömen am Anfang der Leitung ($\mathfrak{V}_0$, $\mathfrak{J}_0$) und im Abstande x vom Anfang die Beziehungen[1]; [vgl. auch (111)]:

$$\mathfrak{V}_x = \mathfrak{A}\mathfrak{V}_0 - \mathfrak{B}\mathfrak{J}_0 \qquad \text{oder}^{2)} \qquad \mathfrak{V}_0 = \mathfrak{P}\mathfrak{J}_0 - \mathfrak{Q}\mathfrak{J}_x,$$

$$\mathfrak{J}_x = \mathfrak{A}\mathfrak{J}_0 - \mathfrak{C}\mathfrak{V}_0, \qquad \mathfrak{V}_x = \mathfrak{Q}\mathfrak{J}_0 - \mathfrak{P}\mathfrak{J}_x,$$

$$\mathfrak{A} = \operatorname{Cof} \gamma x; \qquad \mathfrak{B} = \mathfrak{Z} \operatorname{Sin} \gamma x; \qquad \mathfrak{C} = \mathfrak{Z}^{-1} \operatorname{Sin} \gamma x;$$

$$\mathfrak{P} = \mathfrak{Z} \operatorname{Cotg} \gamma x; \qquad \mathfrak{Q} = \mathfrak{Z} \frac{1}{\operatorname{Sin} \gamma x}; \qquad \mathfrak{Z}^2 = \frac{R + i\omega L}{G + i\omega C},$$

$$\gamma^2 = (\beta + i\delta)^2 = (R + i\omega L)(G + i\omega C).$$

γ = Fortpflanzungskonstante, β = Dämpfungskonstante, δ = Winkelmaß, $\mathfrak{Z}$ = Wellenwiderstand oder Charakteristik der Leitung für Wechselstrom der Kreisfrequenz ω.

$$2\beta^2 = RG - LC\omega^2 + \sqrt{(RG - LC\omega^2)^2 + \omega^2(LG + RC)^2},$$

angenähert

$$\beta = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Bei festliegendem $\mathfrak{J}_0$, $\mathfrak{V}_0$ bewegen sich die Endpunkte der Vektoren $\mathfrak{J}_x$, $\mathfrak{V}_x$ auf logarithmischen Spiralen[3]. Wendet man die Gleichungen auf das Leitungsende $x = l$ an, so erkennt man, daß zwischen den Strömen und Spannungen der Enden lineare Gleichungen (mit komplexen Koeffizienten) bestehen:

$$\mathfrak{V}_0 = \mathfrak{A}\mathfrak{V}_l + \mathfrak{B}\mathfrak{J}_l,$$

$$\mathfrak{J}_0 = \mathfrak{A}\mathfrak{J}_l + \mathfrak{C}\mathfrak{V}_l.$$

Bei der Berechnung von Fernsprechleitungen ist als mittlere Frequenz der Sprechströme $f = 800$ ($\omega = 5000$) einzusetzen.

c) Ausgleichsvorgänge. Unmittelbar nach dem Einschalten, Ausschalten der Leitung oder nach irgendeiner Veränderung des Stromkreises lagern sich den stationären Werten V, I freie Schwingungen über, die mitunter Über-

---

1) A. Franke, ETZ 1891, S. 458. — F. Breisig, ETZ 1899, S. 383.

2) Pleijel, Bd. 4 der Veröff. der 2. Int. Konf. von Technikern der Staatstelegraphen- und Fernsprechverwaltungen; Paris 1910.

3) F. Breisig, ETZ 1900, S. 87.

Überspannungen und Überströme zur Folge haben. Die freie Schwingung kann im allgemeinen in der Form dargestellt werden[1]):

$$V_f = e^{-\alpha t}\left\{F_1(x - vt) + F_2(x + vt)\right\},$$

$$I_f = e^{-\alpha t}\sqrt{\frac{L}{C}}\left\{F_1(x - vt) - F_2(x + vt)\right\},$$

$$\alpha = R/2L + G/2C; \quad v = 1/\sqrt{LC},$$

das heißt durch Wellen F_1, F_2 die mit der Geschwindigkeit v in Richtung wachsender bzw. abnehmender x auf die Leitung gedämpft fortschreiten (sogenannte „Wanderwellen"). Die Größe $\sqrt{L/C}$ ist der Wellenwiderstand, d. i. das Verhältnis der Spannung zum Strom in der Welle. Auf oberirdischen Leitungen ist die Wellengeschwindigkeit v nahezu gleich der Lichtgeschwindigkeit; auf Kabeln ist sie erheblich kleiner. Die Wellenformen F_1, F_2 entstehen durch Übereinanderlagerung der Grundwelle und einer unendlichen Reihe von Oberwellen des Systems, die im allgemeinen nicht harmonisch sind, und deren Frequenzen durch die Länge der Leitung und die Beschaffenheit der Apparate an den Leitungsenden bestimmt sind. Von der Beschaffenheit der Enden hängt auch das Gesetz ab, nach dem die auf die Enden prallenden Wellen F_1, F_2 reflektiert werden. Schließt sich ein Ende über einen Ohmschen Widerstand $R_0 = \sqrt{L/C}$, so findet daselbst vollkommene Absorption (ohne Reflexion) der Wellen statt. Eine mäßige Selbstinduktion von R_0 ist praktisch unschädlich.

Die auf ein offenes Leitungsende prallende Spannungswelle verdoppelt sich; die zugehörige Stromwelle zieht sich mit derselben Geschwindigkeit wieder zurück. An einem kurzgeschlossenen Leitungsende vertauschen die beiden Wellen ihre Rolle.

Wird ein Strom I auf einer Leitung unterbrochen, so zieht er sich von der Unterbrechungsstelle mit der Geschwindigkeit v zurück und hinterläßt eine Spannung

$$V_f = I\sqrt{L/C},$$

die davon herrührt, daß die dem Strome I entsprechende magnetische Energie vom Betrage $^1/_2 L I^2$ in elektrische Energie vom Betrage $^1/_2 C V_f^2$ übergeht. Ist die Leitung am anderen Ende induktiv belastet, derart, daß beim Strome I hier ein Betrag $^1/_2 L_0 I^2$ an magnetischer Energie aufgespeichert ist, so kann sich die Spannung der Leitung durch wiederholte Reflexion der Wellen an den beiden Leitungsenden noch beträchtlich steigern; die höchste Spannung wird, wenn L_0 mehrmals größer als L ist, angenähert $I\sqrt{L_0/C}$. Glücklicherweise haben richtig bemessene Schalter die Eigenschaft, den Strom nicht plötzlich zu unterbrechen, sondern stetig auf Null zu bringen[2]).

Trifft eine Welle F_1 von einer Leitung mit dem Wellenwiderstand $Z_1 = \sqrt{L_1/C_1}$ auf eine Verbindungsstelle dieser Leitung mit einer zweiten Leitung vom Wellenwiderstand $Z_2 = \sqrt{L_2/C_2}$, so spaltet sich die Welle in eine reflektierte Welle F_2 und in eine in die Leitung 2 eindringende Welle F_3

[1]) K. W. Wagner, Elektromagnet. Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln, Leipzig 1908. ETZ 1908, S. 707. — Oszillographische Aufnahmen verschiedener Ausgleichsvorgänge sind in der ETZ 1911, S. 899, 928, 947 und 1912, S. 1289 und 1321 mitgeteilt. — W. Petersen, Wanderwellen als Überspannungserreger. Archiv f. Elektrot. Bd. 1, 1912, S. 233; Überspannungen und Überspannungsschutz, ETZ 1913, S. 167 ff.

[2]) Vgl. die von Gerstmeyer aufgenommenen Oszillogramme, Elektr. Kraftbetriebe und Bahnen Bd. 9, S. 141, 1911. Ferner: E. B. Merriam, Proc. Amer. Inst. of El. Eng. 1911, S. 195; K. C. Randall, ebenda 1913, S. 1885; 1915, S. 271; F. Marguerre, ETZ 1912, S. 709, 735; B. Bauer, Untersuchungen an Ölschaltern, ETZ 1915, S. 582; 1916, S. 120, 183; 1917, S. 207; 1919, S. 481; J. Biermanns Arch. f. Elektrot. Bd. 3, 1914 S. 5; G. Stern u. J. Biermanns, Ölschalterversuche, ETZ 1916, S. 617, 635. Vogelsang und Schrottke, Über Hochleistungsschalter, ETZ 1919, S. 597 und 625. J. Biermanns, Über Hochleistungsschalter, ETZ, 1920, S. 325.

$$F_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \qquad F_3 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 .$$

Die Wicklungen von Maschinen und Transformatoren verhalten sich den Ausgleichsvorgängen gegenüber in erster Näherung wie Leitungen mit verteilten Konstanten R, L, C, G. Beim Übergang einer Welle F_1 von einer Leitung (oder einem Kabel) auf eine Transformator- oder Maschinenwicklung ist Z_2 groß gegen Z_1; dann wird $F_2 \approx F_1$; $F_3 \approx 2F_1$: in die Wicklung dringt eine Welle von doppelter Spannung ein. Hat die Welle — wie z. B. beim plötzlichen Einschalten oder Unterbrechen — eine steile Front, so wird auch die Wicklung in sich gefährdet, weil zwischen benachbarten Windungen die volle Wellenspannung auftritt, so daß Gefahr des Durchschlags entsteht. Diese Gefahr nimmt ab, je weiter die Welle eindringt, weil die Eisenverluste die Welle dämpfen, jedoch staut sich die Welle im Mittelpunkt der Wicklung abermals.

Dieselbe Gefahr tritt ein, wenn ein Stromerzeuger (Spannung E) auf eine Leitung oder ein Kabel geschaltet wird. Dann ist Z_2 klein gegen Z_1 und somit $F_2 \approx -F_1 \approx -E$. Hier gefährdet also die reflektierte Welle die Isolation der einzelnen Windungen gegeneinander. Wirksamen Schutz gewähren Drosselspulen, die man der gefährdeten Wicklung vorschaltet; die Spulen wirken wie kurze Leitungen von sehr hohem Wellenwiderstand. Daraus folgt, daß die Spule selbst gut isoliert werden muß, weil nun sie den Spannungsstoß erhält. Die genauere Untersuchung[1]) hat gelehrt, daß die Kapazität zwischen den Windungen der gefährdeten Wicklung die steile Stirn der Welle abflacht und dadurch die Beanspruchung mildert; die Schutzdrossel soll eine möglichst geringe Kapazität gegen Erde haben. — Ein zweiter Weg zur Verkleinerung der Welle F_2 besteht darin, daß man die Leitung zuerst über eine Widerstandsstufe einschaltet, die am Ende der Schalterbewegung kurz geschlossen wird (Schutzschalter). Ferner eignen sich auch Kondensatoren von hinreichend großer Kapazität, die man zwischen Hin- und Rückleitung schaltet, zur Abflachung steiler Wellenstirnen (950—956).

Die auf den Leitungen laufenden Wanderwellen übertragen sich durch elektromagnetische Induktion auf benachbarte Leitungen. Näheres hierüber bei K. W. Wagner, ETZ 1914, S. 639, 677, 705.

Die Darstellung durch unverzerrt fortschreitende Wellen wird ungenau, wenn die Leitung so lang ist, daß die Wellen nach Zurücklegung der Leitungslänge auf weniger als ca. $^1/_3$ gedämpft werden[2]).

Im Grenzfall eines sehr langen Kabels (Ozeantelegraphie) darf man L vernachlässigen[3]). Verfahren zur Berechnung der Stromkurven mit Berücksichtigung der Apparate an den Enden sind von F. Breisig[4]), K. W. Wagner[5]) und H. W. Malcolm[6]) angegeben worden.

Für Leitungen beliebiger Länge lassen sich die Strom- und Spannungskurven beim Einschalten bequem mittels der Heavisideschen Regel (114) berechnen.

(116) Kettenleiter. Man denke sich n beliebige, gleichartige Stromkreise. Der erste Kreis sei mit dem zweiten in irgendeiner Weise gekoppelt; die gleiche Art der Kopplung bestehe zwischen den folgenden Kreisen. Eine solche kettenartige Anordnung nennt man einen Kettenleiter erster oder zweiter Art, je nachdem die Einzelkreise (die Kettenglieder) der oberen oder der unteren Schaltung in Abb. 33 entsprechen. Bei $a_1 a_2$ bzw. $e_1 e_2$ erfolgt die Stromzuführung, bezw. Stromabnahme. R bedeutet den Widerstandsoperator, G den Leitwertoperator der entsprechend bezeichneten Anordnung. Die Strom- und

---

[1]) Elektrot. u. Maschb., Wien 1915, S. 89, 105; ETZ 1916, S. 425, 440, 456.

[2]) Wegen der dann eintretenden Verzerrung der Wellenform siehe die von Vaschy (Annales télégraphiques, Ser. 3, Bd. 15, S. 481; 1888) und K. W. Wagner (ETZ 1910, S. 163, 192) gezeichneten Kurven. Siehe ferner ETZ 1911, S. 258.

[3]) W. Thomson, Math. and phys. papers 2. Bd., S. 61.

[4]) ETZ 1900, S. 1046.

[5]) Phys. Zeitschr. Bd. 10, S. 865; 1909.

[6]) The theory of the submarine telegraph and telephone cable, London 1917.

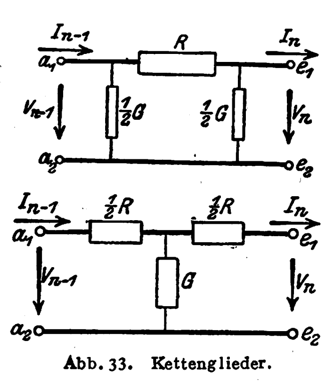


Abb. 33. Kettenglieder.

Spannungsverteilung im Kettenleiter folgt formal denselben Gesetzen wie in Kabeln und Freileitungen (115). Die Fortpflanzungskonstante γ ist durch die Gleichung

$$\mathfrak{Sin}\,\frac{1}{2}\gamma = \frac{1}{2}\sqrt{RG}$$

definiert. Der Wellenwiderstand beträgt

$$W_1 = \sqrt{\frac{R}{G}} / \mathfrak{Cof}\,\frac{1}{2}\gamma, \text{ bzw. } W_2 = \sqrt{\frac{R}{G}} \cdot \mathfrak{Cof}\,\frac{1}{2}\gamma$$

für den Kettenleiter erster, bzw. zweiter Art.

Die Schaltung der Zweige R und G von wichtigen Kettenleitern und deren Bedeutung und Verwendung geht aus der folgenden Zusammenstellung hervor:

Schaltung R	Schaltung G	Bedeutung und Verwendung.
K	C	Kettenisolator; Serienfunkenstrecke,
R	C	künstliches Telegraphenkabel.
L	C	künstliche Leitung; Drosselkette, zum Abdrosseln aller Ströme, deren Kreisfrequenz oberhalb $\omega_0 = 2/\sqrt{LC}$ liegt.
C	L	Kondensatorleitung, zum Abdrosseln aller Ströme, deren Kreisfrequenz unterhalb $1/2\sqrt{LC}$ liegt.
L K	C	Siebketten, Filter; zum Abdrosseln aller Ströme außer denen, deren Kreisfrequenz zwischen $\omega_1 = 1/\sqrt{LK}$ und $\omega_2 = 1\sqrt{LK'}$, bezw. $\omega_1 = 1/\sqrt{MC}$ und $\omega_2 = 1/\sqrt{M'C}$ liegt, wobei $K' = KC/(4K+C)$, $M' = LM/(L+4M)$.
L	M C	
L K	M C	Doppelsieb, $LK = MC$, Siebkette mit besonders ausgeprägter Wirkung.
L K	M C	Wellenschlucker, $LK = MC$; starke Drosselwirkung nur für die Wechselströme, deren Kreisfrequenz bei $1/\sqrt{LK}$ liegt.

K. W. Wagner, Archiv f. Elektrotechnik, Bd. 3, 1915, S. 315; Bd. 8, 1919, S. 61.

Lehrbücher über die Theorie der veränderlichen Ströme.

F. Bedell und A. C. Crehore, Alternating currents, Ithaca, N. Y. 1892; deutsch von Bucherer, Berlin 1895. — C. P. Steinmetz, Alternating current phenomena, New York 1898 (2. Aufl.); deutsche Ausgabe Berlin 1900. — J. Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie, Stuttgart 1905. — A. Russell, A treatise on the theory of alternating currents, 2 Vol. Cambridge 1904—1906. — E. Orlich, Kapazität und Induktivität, Braunschweig 1909. — J. L. La Cour und O. S. Bragstad, Bd. 1 von Arnolds Wechselstromtechnik, Berlin 1910 (2. Aufl.). — A. Hay, Alternating currents 1912. — E. Orlich, Die Theorie der Wechselströme, Leipzig 1912. — A. Fraenkel, Theorie der Wechselströme, Berlin 1914.

Über die Theorie der Leitungen und Kabel.

O. Heaviside, Electrical Papers, 2 Bde. London 1892; Electromagnetic theory, Bd. 2, London 1899. — H. Weber, Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik nach Riemanns Vorlesungen in vierter Auflage neu bearbeitet, Braunschweig 1900. Fünfte Auflage, ebendort 1910. — K. W. Wagner, Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln, Leipzig 1908. — F. Breisig, Theoretische Telegraphie, Braunschweig 1910. — H. W. Malcolm, The theory of the submarine telegraph and telephone cable, London 1917. Benn Brths. Ltd.

Zweiter Teil.

Meßkunde.

Erster Abschnitt.

Elektrische Meßverfahren und Meßvorrichtungen.

Hilfsmittel bei den Messungen.

Allgemeines.

(117) Genauigkeit. Nach der anzustrebenden Genaugikeit sind die zur Messung benutzten Methoden und Instrumente zu wählen. In manchen Fällen stellen die Beobachtungsergebnisse bereits das gewünschte Resultat dar, häufig muß dies aber erst durch Rechnung auf Grund physikalischer Gesetze aus den Beobachtungen abgeleitet werden.

Dabei gilt als allgemeine Regel, daß die verschiedenen Faktoren einer jeden Messung gleiche Genauigkeit besitzen sollen; wünscht man demnach eine Genauigkeit von 1 %, so müssen die Methoden und die Meßinstrumente hiernach gewählt werden, während die arithmetische Rechnung mit höchstens 4 Ziffern geführt, das Schlußergebnis nur mit 3 Ziffern mitgeteilt wird; feinere Instrumente als nötig zu verwenden, mit mehr als 4 Ziffern zu rechnen, wäre als eine Zeitverschwendung anzusehen.

Stellt man viele Beobachtungen an, so ist der Fehler des Mittels erheblich kleiner als der des einzelnen Ergebnisses; bei einer größeren Zahl von Beobachtungen darf man rechnen, daß der Fehler des Mittels der Quadratwurzel der Zahl der Beobachtungen umgekehrt proportional sei. — Es ist nicht erlaubt, aus der Zahl der erhaltenen Ergebnisse solche wegzustreichen, welche besonders große Abweichungen vom Mittel aufweisen, es sei denn, daß bei der Messung irgend ein gröberes Versehen begangen worden ist.

Ergänzungs- oder Berichtigungsgrößen. Jede Messung erfordert neben der Bestimmung der wesentlichen Größen noch je nach der gewünschten Genauigkeit die Ermittlung einer kleineren oder größeren Zahl von Ergänzungsgrößen.

Während man bei rohen Messungen die Instrumente und Apparate oft ohne Korrektionen benutzen und die Rechnung nach Annäherungsformeln durchführen kann, sind bei genaueren Messungen, beispielsweise bei Vergleichung von Widerständen, die Korrektionen der benutzten Vergleichswiderstände, bei noch größerer Genauigkeit auch deren Temperaturkorrektionen zu bestimmen und zu berücksichtigen. Infolgedessen werden umsomehr Hilfsmessungen und Nebenrechnungen nötig, je größer die angestrebte Genauigkeit sein soll.

Da die Ergänzungsgrößen meist nur einen untergeordneten Einfluß auf das Ergebnis haben, brauchen sie auch nur mit einer geringeren Genauigkeit bestimmt zu werden als die Hauptgrößen. Bei der Berücksichtigung der Ergänzungsglieder wendet man nach Möglichkeit die Regeln für das Rechnen mit kleinen Größen an (9).

Einige besondere Einrichtungen an Meßvorrichtungen.

(118) Ablesung des Ausschlags. Zeigerablesung. Drehungswinkel (Ausschläge) von Galvanometern, Magnetometern usw. können an Zeigern abgelesen werden, hinter denen, wenn Parallaxe vermieden werden soll, ein Spiegel angebracht ist. Man bringt dann den Zeiger mit dem Spiegelbild zur Deckung. Häufig werden die Teilungen schon aus Spiegelglas angefertigt oder von vornherein Spiegel neben den Teilungen angebracht. Statt eines Spiegels hinter dem Zeiger kann man auch einen dicken unbelegten Spiegelglasstreifen vor dem Zeiger benutzen; blickt man schräg auf den Zeiger, so erscheint dieser gebrochen.

Spiegelablesung (Poggendorf, Gauß). Will man noch größere Genauigkeit der Ablesung erhalten, so benutzt man die Spiegelablesung (Lichtzeiger); diese kann entweder objektiv (Lichtbild auf einer Skala) oder subjektiv (Ablesung durch ein mit Fadenkreuz versehenes Fernrohr) sein. Die objektive Ablesung ist für das Auge weniger ermüdend, aber nicht so genau wie die subjektive Ablesung. Zum Zweck der Spiegelablesung wird auf dem beweglichen System, dessen Drehungswinkel gemessen werden soll, ein Spiegel angebracht. Senkrecht zur Ruhelage des Spiegels wird eine Richtung entweder durch die Visierlinie eines Fernrohrs oder durch das von einer Lampe durch einen Spalt gesandte Lichtbündel bzw. einen glühenden Platindraht oder eine Nernstlampe festgelegt.

Während der Ruhe des Spiegels sieht man im Fernrohr einen bestimmten mittleren Teilstrich, bzw. wird der letztere von dem zurückgestrahlten Bilde der Lichtquelle beleuchtet. Bei einer Drehung des Spiegels um den Winkel φ tritt eine Verschiebung des Spiegel- oder Lichtbildes um eine Länge n ein, welche das Maß der Drehung bildet. Beobachtet man die Ruhelage des Spiegels und Ablenkung nach einer Seite, so ist n gleich der Differenz der beiden Ablesungen. Beobachtet man aber (z. B. unter Stromwendung) Ausschläge nach links und rechts von der Ruhelage, so ist n gleich der halben Differenz der Ablesungen. Dann gilt, wenn A die Entfernung des Spiegels von der Skala bedeutet, die Beziehung $n/A = \operatorname{tg} 2\varphi$. Bei kleinen Winkeln kann man für $\operatorname{tg} 2\varphi$ den Bogen 2φ setzen.

Wenn es irgend angängig ist, sollte man die Messungen so einrichten, daß man sogenannte Nullmethoden verwendet, d. h. solche Methoden, bei denen das Galvanometer usw. nur als Indikator für Stromlosigkeit oder Stromgleichheit (Differentialgalvanometer) verwendet wird. In diesem Fall können kleine Ausschläge zur Interpolation des richtigen Wertes der zu beobachtenden Größe verwendet werden. Andernfalls hängt die Genauigkeitsgrenze der Messungen davon ab, mit welcher Genauigkeit der Ausschlag sich bestimmen läßt, während man bei Nullmethoden die Genauigkeit viel weiter treiben kann.

Mitunter werden auch Skalen in Kreisform benutzt, in deren Zentrum sich der Spiegel befindet. Dann liefert die Ablesung direkt den Winkel.

Aufstellung von Spiegelinstrument, Skala und Fernrohr bzw. Lichtquelle.

Um eine möglichst sichere und unveränderliche Aufstellung zu erhalten, stellt man das Galvanometer auf ein Konsol, das an der Wand befestigt ist, und zwar zweckmäßig auf festgekittete Fußplatten. Wenn die Erschütterungen des Spiegels zu groß sind, muß die erschütterungsfreie Aufhängung des Instruments nach Julius verwendet werden (119). Skalenabstand und -richtung werden, falls mit größeren Ausschlägen beobachtet werden soll, durch ein langes Fadenpendel, das von der Decke herabhängt, und dessen Faden durch eine kleine an der Skala angeschraubte Öse oder Hülse hindurchgeht, und eine an der Wand angebrachte Visiermarke geprüft und danach konstant erhalten. (Vgl. W. Kohlrausch, El. Zeitschr. 1886.) Je weiter die Skala vom Spiegel entfernt ist, desto größer ist die Ablesegenauigkeit, während sie von der Entfernung des Fernrohrs (bzw. der Lichtquelle) vom Spiegel unabhängig ist.

Bei großer Skalenentfernung empfiehlt es sich, für die subjektive Methode mit dem Fernrohr nahe an den Spiegel heranzugehen, um nicht zu starke Ver-

größerungen für das Fernrohr anwenden zu müssen. Häufig ist die Skala am Fernrohrstativ befestigt, so daß auch das Fernrohr hierdurch schon seine Stellung hat. Die Skala muß gut beleuchtet sein. Es ist erwünscht, daß das Fernrohr eine Feinverstellung mittels Mikrometerschraube besitzt, die es um kleine Winkel zu drehen gestattet. Das Fernrohr muß so eingestellt werden, daß die Parallaxe vermieden wird, d. h. daß bei einer Verschiebung des Auges vor dem Okular das Fadenkreuz und Skalenbild sich nicht gegeneinander verschieben.

Bei der objektiven Spiegelablesung muß entweder das Instrument einen Hohlspiegel besitzen, durch den das Bild der Lichtquelle auf der Skala entworfen wird, oder man muß an geeigneter Stelle zwischen Lichtquelle und Spiegel eine Linse einschalten, was auch geschehen kann, wenn das Instrument zwar einen Hohlspiegel besitzt, dieser aber nicht die für die gewünschte Entfernung geeignete Brennweite besitzt.

Unbequem ist die objektive Ablesung dadurch, daß man, besonders bei Verwendung schwächerer Lichtquellen, die Skala, die in diesem Fall zweckmäßig durchscheinend ist, im Dunkeln aufstellen muß; bei starken Lichtquellen (Nernstlampe) ist dies meist nicht nötig.

(119) Erschütterungsfreie Aufhängung. (Julius, Wied. Ann. Bd. 56.) Das aufzustellende Meßinstrument kommt auf eine wagrechte Platte zu stehen und wird mit dieser an drei langen parallelen dünnen Stahldrähten (am besten Nickelstahl) aufgehängt. Es ist zweckmäßig, das System, auf welchem das Galvanometer aufgestellt ist, noch mit einer Flüssigkeitsdämpfung zu versehen. Derartige Systeme sind jetzt im Handel zu beziehen. — Eine einfache Einrichtung zum gleichen Zweck beschreibt Volkmann in der Physik. Zeitschr. 1911, S. 75.

Dämpfung und Beruhigung. Zur Ablesung der Ausschläge bei Meßinstrumenten braucht man die geringste Zeit, wenn das schwingende System aperiodisch gedämpft ist, d. h. gerade keine Schwingungen mehr um die Gleichgewichtslage ausführt. Ist das schwingende System wenig gedämpft, so dauert es lange, bis es zur Ruhe kommt, und man verliert viel Zeit, wenn man die Schwingungen nicht beruhigt oder aus den Ausschlägen zu beiden Seiten der Gleichgewichtslage nach der von der Wage her bekannten Methode die Gleichgewichtslage ermittelt.

Beruhigung von Magnetnadeln. Magnetnadeln kann man durch geeignetes Nähern und Entfernen eines Magnetstabes leicht zur Ruhe bringen. Bequemer ist es, das Instrument mit einer besonderen dämpfenden Vorrichtung zu versehen; eine solche Dämpfung muß aus einem Widerstande bestehen, der sich der Bewegung der Nadel entgegenstellt, der aber verschwindet, sobald die Nadel zur Ruhe kommt.

Manche Instrumente, wie z. B. die Drehspulengalvanometer, besitzen schon eine natürliche Dämpfung und man kann es bei diesen Instrumenten so einrichten, daß man unter den günstigsten Verhältnissen, d. h. mit aperiodischer Dämpfung arbeitet (127).

Bei schwingenden Magneten kann man Kupferdämpfung anwenden, ebenso auch Luft- oder Flüssigkeitsdämpfung; die beiden letzteren Dämpfungsmethoden sind auch bei anderen schwingenden Systemen (z. B. bei Elektrometern) anwendbar. Die meisten modernen Instrumente besitzen bereits eine zu ihrer Benutzung bequeme Dämpfung, die unter Umständen auch verschieden einstellbar ist.

(120) Schutz der Galvanometer gegen magnetische Störungen, besonders gegen Störungen durch elektrische Bahnen. Einen sehr wirksamen magnetischen Schutz durch Hüllen aus weichem Eisen besitzen die neuerdings viel benutzten Kugelpanzergalvanometer nach du Bois und Rubens (135), welche gleichzeitig eine hohe Empfindlichkeit haben. Die Drehspulengalvanometer (136) sind in fast allen Fällen genügend störungsfrei und bedürfen keines weiteren Schutzes. Vollkommen astatische Galvanometer sind in einem homogenen Feld gleichfalls

störungsfrei; ganz vollkommene Astasie ist aber bei kleinen Magnetsystemen nie zu erreichen. Vgl. auch (133), letzter Absatz und (134), 3. Absatz.

(121) Fehler durch Thermokräfte. An Berührungsstellen verschiedener Metalle entstehen leicht durch Erwärmung (Berührung durch die Finger, Strahlung durch den Körper, durch den Ofen, Reibung bei Gleitkontakten) EMKräfte, welche Messungsfehler verursachen. Es ist daher bei genauen Messungen stets auf die Möglichkeit dieser Fehlerquelle Rücksicht zu nehmen und, wo es angeht, die Größe des Fehlers zu bestimmen, oder der Fehler zu eliminieren, z. B. durch Vertauschung der Stromrichtung (122).

(122) Stromwender. Zum Verringern bzw. Eliminieren von Fehlern im Stromkreis (Thermokräfte, unsymmetrische Aufstellung des Galvanometers, unsymmetrische Torsionseinflüsse usw.) verwendet man Stromwender (Kommutatoren), die zweckmäßig möglichst unmittelbar hinter der zur Erzeugung des Meßstromes benutzten Batterie angewendet werden, damit sie nicht selbst ähnliche Störungen hervorrufen.

Die Kontakte der Stromwender werden vielfach durch Quecksilbernäpfe hergestellt; in einem Brett aus paraffiniertem Holz oder bequemer in einem flachen parallelepipedischen Körper aus Paraffin befestigt man Fingerhüte oder dergl. zur Aufnahme des Quecksilbers; in das Quecksilber tauchen starke Kupferdrähte, deren Enden man vorher in eine Auflösung von Quecksilber in Salpetersäure eingetaucht und tüchtig abgerieben hat; dieses Verquicken muß von Zeit zu Zeit wiederholt werden. Ein großer Übelstand dieser Kontakte ist das Verspritzen des Quecksilbers bei größerer Stromstärke; für technische Apparate sind Quecksilberkontakte deshalb häufig schlecht zu gebrauchen. Einen völlig thermokraftfreien Quecksilberstromwender, bei dem das Kommutieren durch Umlegen von Hähnen bewirkt wird, hat Des Coudres angegeben (Wied. Ann. Bd. 43, S. 681; 1891). Wo es auf den Widerstand der Kontakte weniger ankommt, verwende man federnde Kontakte aus Kupfer oder Messingblech, die von Zeit zu Zeit mit Schmirgel gereinigt oder mit Petroleum abgerieben werden.

(123) Induktionsfreie Wicklung. Wenn ein stromdurchflossener Leiter keine Wirkung auf ein Meßinstrument sowie keine Selbstinduktion haben darf, führt man ihn so, daß die eine Hälfte des Leiters die gleiche und entgegengesetzte Wirkung hat wie die andere. Gewöhnlich wird dies dadurch erzielt, daß man den Draht von der Mitte aus aufspannt oder aufwickelt, so daß beide Hälften des Drahtes genau nebeneinander liegen (bifilare Wicklung, z. B. bei den Widerstandsrollen der Meßrheostaten). Ähnliche Einrichtungen sind auch nötig für die Abzweigungswiderstände der Galvanometer. Die bifilaren Widerstände haben eine nicht immer unmerkliche Ladungsfähigkeit (Kapazität). Nach Chaperon (Comptes rendus Bd. 108, S. 799) erhält man Widerstände, die sowohl von Induktion wie von Kapazität möglichst frei sind, dadurch, daß man den Draht in gleichen, nicht zu großen Abschnitten mit abwechselnder Richtung aufwickelt (abwechselnd unifilare Wicklung).

Cauro (Comptes rendus Bd. 120, S. 308) verbessert die Chaperonsche Wicklungsmethode noch dadurch, daß er nach Vollendung einer Wicklungslage mittels eines gerade geführten Drahtes zurückkehrt und die folgende Lage am selben Ende beginnen läßt wie die vorhergehende. Die Kapazität wird dadurch noch um die Hälfte ermäßigt. Über diese und andere Wicklungsarten zur Verringerung der Kapazität vgl. W. Jaeger, Elektrische Meßtechnik (A. Barth, 1917).

Hilfsbestimmungen.

(124) Torsionsverhältnis. Wenn das schwingende System an einem einzelnen Faden oder Draht aufgehängt ist, so übt dieser Faden während der Ablenkung ein Moment auf die Nadel aus, welches unter Umständen erheblich wird und dann bei Messung des absoluten Ausschlagwinkels berücksichtigt werden muß,

falls die Skala nicht empirisch geeicht wird. Dieses Torsionsmoment ist dem Torsionswinkel proportional. Zur Messung des Torsionswinkels tragen viele Instrumente eine Teilung am oberen Ende der Aufhängeröhre (näheres siehe Kohlrauschs Lehrbuch).

Um ein möglichst geringes Torsionsverhältnis zu bekommen, wähle man einen sehr dünnen Aufhängefaden und mache den Faden lang. Am besten sind Quarzfäden, die aus geschmolzenem Quarz oder Kiesel hergestellt werden; Kokonfäden sind ein wenig hygroskopisch und zeigen elastische Nachwirkung, so daß die Ruhelage des aufgehängten Körpers nicht ganz konstant ist; auch müssen sie bei gleicher Tragkraft dicker sein als Quarzfäden. Die direkt abgespulten Kokonfäden lassen sich leicht in zwei Teile spalten; am feinsten sind die inneren Fäden eines Kokons.

Schwerere Magnete werden an Fadenbündeln aufgehängt. In manchen Fällen benutzt man feine Metalldrähte oder -bänder zur Aufhängung, die z. B. bei Drehspulengalvanometern wegen der Stromzuführung angewendet werden.

(125) Bestimmung einer Richtkraft. Wenn die Richtkraft nicht bekannt ist oder berechnet werden kann, läßt sie sich aus Schwingungsbeobachtungen finden. Kennt man das Trägheitsmoment J des schwingenden Körpers (vgl. S. 19) und beobachtet die Schwingungsdauer (Halbperiode t, so ist die Richtkraft $D = \pi^2 J / t^2$. Kennt man das Trägheitsmoment nicht, so muß man es experimentell bestimmen, indem man zunächst die Schwingungsdauer mißt, sodann das Trägheitsmoment um einen bekannten Wert vergrößert und die neue Schwingungsdauer beobachtet.

Bestimmung der horizontalen Stärke des Erdmagnetismus. Die Horizontalintensität des Erdmagnetismus findet infolge der großen Störungen, denen sie durch äußere magnetische Einflüsse ausgesetzt ist, heute nur noch selten Anwendung. Man ist deshalb auch meist von den das Erdfeld benutzenden Instrumenten zu solchen mit künstlichen Feldern übergegangen. (Kugelpanzergalvanometer, Drehspulengalvanometer). Die Horizontalintensität des Erdfeldes wird mit Hilfe der in (28, 29) gegebenen Formeln durch Beobachtung der Schwingungsdauer einer Magnetnadel und deren Ablenkung durch Hilfsmagnete bestimmt. (Näheres siehe Kohlrauschs Lehrbuch.)

Galvanometer.

(126) Arten der Galvanometer. Während man früher als Galvanometer meist nur die mit beweglichen Magnetnadeln versehenen Instrumente bezeichnete, hat der Sprachgebrauch allmählich den Begriff auch ausgedehnt auf Instrumente, welche sehr verschiedene Wirkungen des elektrischen Stroms als Maß seiner Stärke benutzen (z. B. Hitzdrahtgalvanometer bzw. -amperemeter, das die Wärmewirkung des Stroms benutzt, Vibrationsgalvanometer, das auf der Resonanzerscheinung bei Wechselstrom beruht), während anderseits wieder spezielle Arten von Galvanometern mit besonderen Namen belegt werden (Dynamometer, Oszillograph), die einem bestimmten Zweck, für den das Instrument zunächst bestimmt war, Rechnung tragen.

Hier sollen unter Galvanometern nur solche Instrumente verstanden werden, welche die dynamische Wirkung des Stroms benutzen.

Es gibt jetzt zwei Klassen von Instrumenten dieser Art; die eine Sorte, die Nadelgalvanometer, haben ein bewegliches System aus permanenten Magneten (oder weichem Eisen) und eine feststehende Spule, die von dem zu messenden Strom durchflossen wird. Die andere Sorte hat ein bewegliches Stromsystem und feststehende permanente Magnete oder Elektromagnete. Zur letzteren Klasse gehören die Drehspulengalvanometer und die Einthovenschen Saitengalvanometer. Diesen Instrumenten reihen sich die Dynamometer, welche eine feststehende und eine bewegliche Spule haben, an; diese in erster Linie für Wechsel-

strommessungen benutzten Instrumente, welche aber auch vorteilhaft zur Energiemessung bei Gleichstrom verwendet werden können, werden in einem besonderen Abschnitt behandelt (144 u. f.), ebenso die Vibrationsgalvanometer (149), Telephone (148), Oszillographen (215, 3) usw., sowie die speziell für Wechselstrommessung dienenden Weicheiseninstrumente (140).

Eine besondere Art von Galvanometern, welche in beiden Klassen Anwendung finden, sind die Differentialgalvanometer, bei denen sich die Wirkungen zweier in getrennten Stromleitern fließenden Ströme auf das bewegliche System aufheben (142).

Hinsichtlich der Art, wie die Ausschläge abgelesen werden, zerfallen die Galvanometer wiederum in Spiegel- und Zeigergalvanometer. Dies ist allerdings kein prinzipieller Unterschied; es gibtsogar Galvanometer, bei denen gleichzeitig beide Ablesungsmöglichkeiten vorhanden sind.

Bei den Spiegelgalvanometern werden meist nur kleinere Winkelausschläge benutzt, während bei den Zeigerinstrumenten, welche mit empirischer Skala versehen sind, meist recht erhebliche Winkel in Anwendung kommen.

Vor der Behandlung der einzelnen Galvanometertypen werden im folgenden die für alle Galvanometer, welche schwingende Systeme besitzen, gemeinsamen Eigenschaften erörtert, die in erster Linie für Spiegelgalvanometer von Bedeutung sind.

(127) Die Schwingungsdauer (halbe Periode) eines völlig ungedämpften Systems in Sekunden ist $t=\pi\sqrt{J/D}$, wenn J das Trägheitsmoment, D die auf das System ausgeübte Richtkraft bedeutet.

Ist das System gedämpft, und stehen zwei aufeinanderfolgende Schwingungen a_1, a_2 im Verhältnis $k=a_1:a_2$ (Dämpfungsverhältnis), so heißt $\delta=\log\operatorname{nat} k$, das logarithmische Dekrement (112, 3); die Schwingungsdauer T ist dann größer als im ungedämpften Zustand; nämlich: $T=t\sqrt{1+\delta^2/\pi^2}$.

Die Dämpfung ist proportional der Winkelgeschwindigkeit des Systems; die Konstante, mit der die Winkelgeschwindigkeit zu multiplizieren ist, heißt die Dämpfungskonstante (129).

Die Einstellungszeit des Systems ist am kürzesten, wenn es sich, im sogenannten aperiodischen Grenzfall befindet ($\delta=\infty$), in dem das System ohne eine Schwingung auszuführen, die neue Ruhelage einnimmt. In diesem Fall gilt für die Dämpfungskonstante $p=2\sqrt{JD}$.

Ist die Dämpfung noch größer, so wird das Galvanometer meist unbrauchbar, es „kriecht". Dieser Fall kann bei zu kleinem Widerstand im Galvanometerkreis beim Drehspulengalvanometer leicht eintreten.

(128) Empfindlichkeit. Das Drehmoment d des Stromes 1 CGS (=10 A) auf das System wird als dynamische Galvanometerkonstante bezeichnet. Ist D die Richtkraft, so ist $\varepsilon=M/D$ die Stromempfindlichkeit (in absolutem Maße), d. h. der Winkelausschlag (absolut gemessen, Einheit = 57,33°), welcher der Einheit der Stromstärke in CGS entspricht. Die zu messende Stromstärke ist dann, wenn φ den Ausschlagswinkel in absolutem Maß bedeutet: $I=\varphi/\varepsilon=\varphi D/M$.

Die Stromempfindlichkeit der Spiegelgalvanometer wird gewöhnlich als Ausschlag in Skalenteilen für einen bestimmten Skalenabstand und eine bestimmte Stromstärke und Schwingungsdauer angegeben und als „normale Stromempfindlichkeit" bezeichnet [z. B. bei Nadelgalvanometern für 1 μA und 1 Ω Widerstand bei einem Spiegelabstand von 1000 Skalenteilen und einer ungedämpften Schwingungsdauer (halbe Periode) von 5 s].

Außer der Stromempfindlichkeit interessiert in vielen Fällen die Spannungsempfindlichkeit, welche man aus ersterer erhält, wenn man

diese durch den Widerstand des für das Galvanometer in Betracht kommenden Stromkreises dividiert. Vgl. auch (143).

Zu beachten ist, daß die Strom- bzw. Spannungsempfindlichkeit allein kein Maß für die Güte des Galvanometers abgibt; bei manchen Galvanometern (z. B. beim Einthovenschen Galvanometer) läßt die oben gegebene Definition sogar überhaupt im Stich.

Nicht so sehr die einem bestimmten Strom entsprechende Größe des Ausschlags ist maßgebend für die Brauchbarkeit des Galvanometers, als vielmehr die kleinste Größe, die mit Sicherheit noch abgelesen werden kann.

Diese Größe hängt aber noch von verschiedenen äußeren Faktoren, z. B. der Art der Aufstellung des Galvanometers usw. ab. Ist z. B. die Nullage des Instruments vorzüglich und ebenso der mit einer bestimmten Stromstärke erreichte Ausschlag sehr sicher, so läßt sich durch optische Mittel die Ablesungsgenauigkeit des Instruments erheblich steigern. Unter Umständen kann dann mit dem Instrument eine weitergehende Meßgenauigkeit erzielt werden als mit einem anderen, dessen durch den Ausschlagswinkel definierte Empfindlichkeit zwar erheblich größer ist, das aber eine unsichere Einstellung zeigt.

Diese Umstände sind bei der Wahl der Galvanometer zu berücksichtigen. Wenn man z. B. an einem Ort zu arbeiten hat, der mechanischen Erschütterungen ausgesetzt ist, kommt man häufig mit einem unempfindlicheren Instrument weiter als mit einem hochempfindlichen, falls das erstere weniger von Erschütterungen beeinflußt wird.

(129) Die Dämpfung des Instruments bei Stromdurchgang setzt sich zusammen aus derjenigen im offenen Stromkreis (Luftdämpfung, Rahmendämpfung usw.) und der durch die Bewegung des schwingenden Systems induzierten Dämpfung. Die letztere ist proportional der Geschwindigkeit des Systems und der Größe M^2/R, wenn R den Widerstand des Galvanometerkreises bedeutet. Ist also p die Konstante der gesamten Dämpfung, p_0 diejenige für den offenen Stromkreis, so ist $p = p_0 + M^2/R$. Für Nadelgalvanometer ist das zweite Glied der rechten Seite meist sehr gering, während es bei Drehspulengalvanometern gerade die Hauptrolle spielt.

Ballistischer Ausschlag. Ein kurzer Stromstoß (Entladung eines Kondensators u. dgl.) erteilt dem Galvanometer keine dauernde Ablenkung, sondern bewirkt nur einen Ausschlag, der dann wieder verschwindet: das nähere s. (184).

Nadelgalvanometer.

(130) Verwendung. Die Galvanometer mit einem schwingenden System von permanenten Magneten sind mehr und mehr durch die für die Anwendung bequemeren Drehspulengalvanometer verdrängt werden und finden mit Vorteil nur noch da Anwendung, wo besonders feine Untersuchungen angestellt werden müssen (Strahlungsmessungen, bei Widerstandsthermometern usw.), bei denen eine möglichst große Empfindlichkeit der Messung erreicht werden soll.

Immerhin bieten sie auch mancherlei Vorteile (bequeme Empfindlichkeitsveränderung) und sind auch noch vielfach in verschiedenen Ausführungen in den Laboratorien vorhanden, so daß sie als die ursprünglich einzigen Strommeßapparate auch heute noch Berücksichtigung verdienen.

Ihr Hauptnachteil besteht darin, daß sie von äußeren Störungen des Erdfeldes durch elektrische Bahnen usw. stark abhängen, so daß vorteilhaft astasierte oder durch Eisenumhüllungen geschützte Galvanometer benutzt werden (siehe Kugelpanzergalvanometer (135)).

Aber auch gegen das Erdfeld und äußere Störungen an sich geschützte Galvanometer können durch äußere magnetische Störungen stark beeinflußt werden, wenn der Galvanometerkreis Schleifen besitzt, in welchen durch das wechselnde Feld Ströme induziert werden. Man hat daher nach Möglichkeit darauf zu achten,

daß keine derartigen Stromschleifen entstehen, indem man Hin- und Rückleitungen direkt nebeneinander legt. Dies gilt auch für die Drehspulengalvanometer. Vgl. auch (120) bis (122).

(131) Empfindlichkeit des Nadelgalvanometers. Beim Nadelgalvanometer hängt die Richtkraft, da die Torsionskraft des Fadens meist zu vernachlässigen ist, nur vom Richtfeld ab, das durch Richtmagnete in weiten Grenzen variiert werden kann (Astasierung). Damit wird gleichzeitig die Schwingungsdauer verändert.

Ersetzt man die Spule vom Widerstand R durch eine solche vom Widerstand $1\,\Omega$, deren Wicklung denselben Raum einnimmt, so wird das Drehmoment der Spule angenähert im Verhältnis $\sqrt{R}$ kleiner.

Bedeutet $\mathfrak{H}$ das Feld einer Spule von $1\,\Omega$ für den Strom 1 CGS am Ort der Nadel (vom magnetischen Moment $\mathfrak{M}$), so ist, wenn a eine Konstante bedeutet, die Stromempfindlichkeit $\varepsilon = a\mathfrak{M}\mathfrak{H}t^2\sqrt{R}/J$.

Der Faktor $a\mathfrak{M}\mathfrak{H}/J$, in dem a einen konstanten, vom Instrument abhängigen Faktor bedeutet, ist die dem betreffenden Galvanometer entsprechende Empfindlichkeitskonstante. Je größer diese ist, desto größer ist die Empfindlichkeit. Es kommt also darauf an, das Verhältnis des magnetischen Moments $\mathfrak{M}$ zu dem Trägheitsmoment J der Magnete möglichst groß und das Feld $\mathfrak{H}$ möglichst stark zu machen. Das erstere geschieht dadurch, daß man nach Vorgang von Thomson viele kurze Magnete an einer gemeinsamen Achse befestigt oder Glockenmagnete verwendet (Siemens), das letztere dadurch, daß man das System möglichst klein macht, um die Galvanometerwindungen dem Nadelsystem nahe bringen zu können.

Die größte Empfindlichkeit der Versuchsanordnung wird beim Nadelgalvanometer meist dann erreicht, wenn der Widerstand der Galvanometerwindungen gleich demjenigen des äußeren Schließungskreises gemacht wird.

Vorteilhaft ist es deshalb, auswechselbare Spulen verschiedenen Widerstandes zu haben (es genügt das Verhältnis 1 : 10), auch wickelt man zweckmäßig zwei Drähte parallel auf eine Spule, die entweder hintereinander oder parallel geschaltet oder auch differential gebraucht werden können; dadurch entstehen verschiedene Schaltungsmöglichkeiten.

Die Empfindlichkeit des Galvanometers läßt sich in weiten Grenzen mittels sogenannter Astasierungsmagnete variieren. Falls die Schwingungsdauer durch Schwächung des Erdfeldes vergrößert wird, so ist zu beachten, daß in gleichem Maße, wie die Empfindlichkeit des Galvanometers wächst, auch die äußeren magnetischen Störungen verstärkten Einfluß gewinnen. (Vermeidung dieses Übelstandes siehe Kugelpanzergalvanometer (135).)

Verändert man den Widerstand des Nadelgalvanometers von R_1 zu R_2, die Schwingungsdauer von t_1 zu t_2 und bezeichnet die entsprechenden Stromempfindlichkeiten mit ε_1 und ε_2, so wird $\varepsilon_1 : \varepsilon_2 = t_1^2\sqrt{R_1} : t_2^2\sqrt{R}$, d. h. die Stromempfindlichkeit wächst mit dem Quadrat der Schwingungsdauer (bei ungeändertem Trägheitsmomente) und mit der Wurzel aus dem Widerstand. Daher kann durch Erhöhung der Schwingungsdauer (mittels Astasierung) die Empfindlichkeit erheblich vergrößert werden.

(132) Tangentenbussole, Sinusbussole, Torsionsgalvanometer. Bei diesen Instrumenten ist die mathematische Abhängigkeit der Stromstärke von dem abgelesenen Ausschlag bekannt.

Die Tangentenbussole, welche sowohl als Spiegel- wie als Zeigerinstrument in Gebrauch ist, hat früher vielfach zu absoluten Strommessungen gedient, findet heute aber im Laboratorium kaum noch Anwendung, da man in der Zurückführung der Strommessung auf Normalwiderstand und Normalelement ein viel bequemeres und zuverlässigeres Mittel zur genauen Bestimmung des Stromes in absolutem Maße besitzt; vgl. (180) bis (182). Näheres hierüber, sowie über die Sinusbussole siehe im Lehrbuch von Kohlrausch.

Das Torsionsgalvanometer (mit Zeigerablesung) ist insofern bemerkenswert, als es der Vorläufer der jetzt fast ausschließlich gebrauchten „direkt zeigenden" Instrumente (Präzisionsamperemeter usw. (141)) war und auch den Vorzug dieser Instrumente besitzt, durch äußere magnetische Störungen wenig beeinflußt zu werden. Es war früher in ausgedehntem Gebrauch, ist aber später durch die oben erwähnten Instrumente fast vollkommen verdrängt worden.

Die Stromstärke ist dem Torsionswinkel proportional.

(133) Empfindliche Nadelgalvanometer. Astasie. Die in (132) beschriebenen Galvanometer sind wenig empfindlich, da man nicht über die Genauigkeit der Winkelablesung hinauskommt, und da keine astasierten Magnete verwendet werden.

Die früher viel benutzten Spiegelgalvanometer mit einfachem Magnet (Wiedemannsches Galvanometer, Siemenssches Glockengalvanometer) sind heute infolge der bedeutenden magnetischen Störungen durch elektrische Straßenbahnen kaum mehr anwendbar.

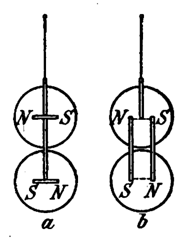


Abb. 34. Astatische Nadelpaare.

Man bedient sich deshalb entweder der Galvanometer mit astatischem Nadelpaar oder der durch Eisenhüllen geschützten Galvanometer, die auch empfindlicher sind als diejenigen mit einfachem Magnet. Die astatischen Nadelpaare werden gebildet durch zwei gleich starke, entgegengesetzt gerichtete Magnete (bzw. Magnetsysteme), die entweder nach Abb. 34a (Thomson) oder b (Weiß) kombiniert werden, wodurch die erdmagnetische bzw. künstliche Richtkraft bedeutend herabgesetzt wird. Dadurch, daß die Nadeln des Systems je durch eine besondere Spule in gleichem Sinn beeinflußt werden, verdoppelt sich die Stromempfindlichkeit.

(134) Galvanometer von Thomson und du Bois und Rubens. Die aus kurzen Magnetnadeln gebildeten Systeme sind auf dem zur Ablesung dienenden Spiegel befestigt. Beide Galvanometer haben 4 Rollen, zwei für das obere (a) und zwei für das untere (b) Magnetsystem (Abb. 35), so daß verschiedene Schaltungsweisen ausgeführt werden können, um das Galvanometer dem jeweiligen Zweck anzupassen. (Mit 4 Spulen von je 20 und von je 2000 Ω lassen sich z. B. folgende Widerstände schalten: 5, 20, 80, 500, 2000, 8000 Ω.)

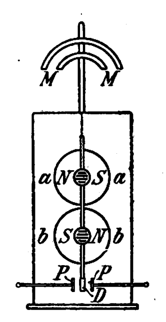


Abb. 35. Thomsonsches Galvanometer.

Wenn das schwingende System gut astatisch ist, d. h. wenn die beiden entgegengesetzt gerichteten Systeme sehr nahe gleiches magnetisches Moment besitzen und möglichst parallel gerichtet sind, hat ein homogenes Feld, wie das Erdfeld, nur eine geringe Einwirkung auf das System, und auch durch magnetische Störungen wird es nur wenig beeinflußt.

Meist bilden die beiden Magnetsysteme einen kleinen Winkel miteinander und die Ebene der Systeme stellt sich dann quer zum magnetischen Meridian, so daß die Resultante beider Systeme mit diesem zusammenfällt. Eine noch weiter gehende Astasierung kann man unter Umständen erreichen, wenn man dem schwächeren Magnetsystem nach dem Vorgang von Siemens & Halske ein Drahtbündel nähert.

Durch äußere Magnete gibt man dem System meist eine bestimmte Richtung, die beliebig zum magnetischen Meridian gerichtet sein kann, von dem man auf diese Weise unabhängig wird.

Man benutzt gewöhnlich zwei oberhalb des Galvanometers an einer gemeinsamen Achse angebrachte Richtmagnete, die zur Erzielung eines homogenen Feldes am Orte der Nadel nach unten gebogen sind (M; Abb. 35). Diese Magnete können in vertikaler Richtung verschoben und gegeneinander verdreht werden. Wenn

die Pole entgegengesetzt gerichtet sind, hebt sich die Wirkung auf die beweglichen Magnete auf. Zum Zweck der Astasierung geht man zweckmäßig von dieser Stellung aus und bringt gleichzeitig die Richtmagnete in größere Entfernung von dem beweglichen System. Indem man sie dann langsam gegeneinander verdreht und allmählich nähert, kann man dem beweglichen System innerhalb bestimmter Grenzen jede beliebige Richtung und Schwingungsdauer erteilen.

Bei leichteren Systemen ist eine Schwingungsdauer (halbe Periode) von 10 s als groß zu betrachten; darüber hinaus wird man selten gehen, da sonst für eine Ablesung eine zu erhebliche Zeit erforderlich ist. Denn in diesem Fall vergeht selbst bei guter Dämpfung des Systems nach einem Ausschlag etwa $^1/_2$—$^3/_4$ Minuten, bis das Galvanometer zu einem neuen Ausschlag bereit ist.

Das schwingende System des Galvanometers von du Bois und Rubens (Keiser & Schmidt) besitzt am unteren Ende eine Dämpferscheibe D, die zwischen verstellbaren Metallplatten P schwingt (Luftdämpfung). Auf diese Weise kann dem Galvanometer eine geeignete Dämpfung erteilt werden.

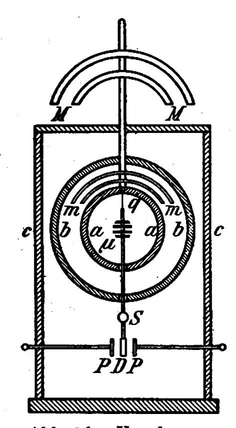


Abb. 36. Kugelpanzergalvanometer.

Die Zuleitungen zu den 4 Spulen sind an Klemmen auf der Bodenplatte des Instruments geführt, um die Schaltungen bequem ausführen zu können.

Wird die „normale Stromempfindlichkeit" des Instruments (128) mit ε_0 bezeichnet, so berechnet sich die einer Schwingungsdauer t und einem Widerstand R der Spulen entsprechende Stromempfindlichkeit $\varepsilon = {}^1/_{25} \cdot E_0 t^2 \sqrt{R}$.

Die normale Stromempfindlichkeit ε_0 beträgt für Thomsonsche Galvanometer (Elliot) und für dasjenige von du Bois-Rubens (mit schwerem System) etwa $\varepsilon_0 = 20$.

(135) Panzergalvanometer. Noch bedeutend besser gegen das äußere Feld geschützt sind die mit Eisenhüllen umgebenen Galvanometer, von denen das gleichfalls von du Bois und Rubens konstruierte sogenannte Kugelpanzergalvanometer[1]) (Siemens & Halske) wohl am bekanntesten ist (Abb. 36).

Dasselbe besitzt nur ein an einem kurzen Quarzfäden q aufgehängtes Magnetsystem (μ), das innerhalb zweier Spulen (a) schwingt, die zusammen eine von weichem Eisen umschlossene Kugel bilden. Eine zweite Hohlkugel b aus weichem Eisen, innerhalb deren sich die Astasierungsmagnete (m) befinden, umschließt diese und wird ihrerseits noch von einem dritten zylinderförmigen Mantel (c) aus weichem Eisen umgeben. Außerhalb dieses Mantels befinden sich die beiden Richtmagnete M. Ablesespiegel S und Dämpferscheibe P sind unterhalb des Magnetsystems angebracht.

Durch die mehrfachen Eisenhüllen ist das Magnetsystem dem Einfluß des Erdfeldes fast völlig entzogen; an seine Stelle tritt als Richtkraft des Systems das künstliche Feld der Magnete m, bzw. das der beiden Magnetsysteme m und M.

Dieses gegen äußere Einflüsse somit vorzüglich geschützte Galvanometer kann meist nur auf einer Juliusschen Aufhängung (119) benutzt werden, da das leichte Magnetsystem gegen Erschütterungen sehr empfindlich ist. Das den Instrumenten jetzt beigegebene (früher als das schwerere System bezeichnete) Magnetsystem besitzt ungefähr eine normale Stromempfindlichkeit (128) $\varepsilon_0 = 60$ bis 80. Das „leichte System" ist meist wegen der Erschütterungen nicht brauchbar; es hat etwa die 10fache Empfindlichkeit.

---

[1]) Ann. d. Phys. (4), Bd. 2, S. 84. 1900; Zeitschr. f. Instrk. Bd. 20, S. 65. 1900.

Drehspulengalvanometer.

(136) Verwendung. Die Drehspulengalvanometer werden wegen ihrer starken elektrodynamischen Dämpfung (127) am besten im aperiodischen Grenzzustand benutzt (127); hierbei ist auch die Spannungsempfindlichkeit praktisch am größten. Da das Galvanometer häufig auch im offenen Stromkreis zur Ruhelage zurückkehren soll, ist eine mäßige Dämpfung durch den Rahmen im offenen Stromkreis erwünscht. Dadurch wird die Empfindlichkeit nur unwesentlich verringert (bei einem Dämpfungsverhältnis $k=2$ z. B. nur um 10%). Durch eine Kurzschlußtaste kann man übrigens meist das Galvanometer sehr schnell dämpfen.

Während bei den Nadelgalvanometern in der günstigsten Meßanordnung der Widerstand der Spule gleich dem äußeren Widerstand zu machen ist, muß beim Drehspulengalvanometer in der günstigsten Schaltung der Widerstand des äußeren Stromkreises gerade den Grenzfall der aperiodischen Schwingung herbeiführen, während der Klemmenwiderstand des Galvanometers möglichst klein sein soll gegen den Gesamtwiderstand des Schließungskreises (141).

Die Drehspulengalvanometer sind in hohem Maße von dem Erdfeld und äußeren Störungen unabhängig. Starke Magnetfelder in der Nähe des Instruments können die Einstellung der stromdurchflossenen Spule allerdings beeinflussen; deshalb ist auch zu berücksichtigen, daß zwei nahe beieinander aufgestellte Instrumente dieser Art sich stören können. (Der Nullpunkt des o f f e n e n Instruments wird natürlich dadurch nicht verändert.) Die Richtkraft, welche dem Drehmoment der Spule entgegenwirkt, wird durch einen Metalldraht bzw. ein ebensolches Band sowie durch die zweite, untere Stromzuführung geliefert. Das Drehmoment der feststehenden Magnete auf die bewegliche Spule ist proportional der Feldstärke, der Stromstärke und der Windungsfläche der Spule. Für den aperiodischen Grenzfall ergibt sich als maximal erreichbare Stromempfindlichkeit $E=\sqrt{2\pi t R/D}$ (alle Größen in CGS), wobei vorausgesetzt wird, daß der Widerstand der Spule sehr klein ist gegen R. Wenn dies nicht der Fall ist, und auch bei offenem Kreis Dämpfung vorhanden ist, wird die Empfindlichkeit kleiner. (Näheres siehe J a e g e r, Ann. d. Phys. (4) Bd. 21, S. 64, 1906). Die Empfindlichkeit wächst also wie beim Nadelgalvanometer mit $\sqrt{R}$, aber nur mit $\sqrt{t}$ (statt mit t^2 beim Nadelgalvanometer). Für kleine Schwingungsdauern (Oszillograph) ist daher das Drehspulensystem besonders günstig.

Wesentlich bestimmend für die Empfindlichkeit ist, wie man sieht, die Richtkraft D, die man möglichst klein zu machen suchen muß; allerdings ist es dann auch nötig, die Trägheit (J) im selben Verhältnis zu verringern, wenn die Schwingungsdauer nicht vergrößert werden soll. Hauptsächlich für Galvanometer mit kleinem Widerstand, die neuerdings immer mehr Bedeutung gewinnen (180), entstehen hierbei Schwierigkeiten, weil bei einer Verringerung der Richtkraft der Widerstand der Zuleitungen zur beweglichen Spule zunimmt.

(137) Ausführungsformen. Die Drehspulengalvanometer mit Spiegelablesung werden verschieden gebaut. Bei manchen Ausführungen schwingt die Spule R in dem schmalen Luftraum zwischen den Magnetpolen M und einem Weicheisenkern E (Abb. 37a), bei anderen Galvanometern ist die Spule lang und ganz schmal, und es ist kein Eisenkern vorhanden (Abb. 37b).

Bei der Ausführung mit Eisenkern schwingt die Spule in einem Feld, in dem die Kraftlinien radial verlaufen, so daß der Ausschlag nahe proportional der Stromstärke ist.

Die Zufügung von Ballastwiderständen zu dem Galvanometer erscheint überflüssig; erwünscht ist, wie es jetzt vielfach geschieht, eine Angabe darüber, mit welchem Widerstand die Galvanometer aperiodisch werden. Die bloße Angabe der Stromempfindlichkeit ist nicht ausreichend und kann sogar irreführend sein, da ein Galvanometer von geringerer Stromempfindlichkeit häufig eine große Meßgenauigkeit gibt. Maßgebend ist die S p a n n u n g s empfindlich-

keit für den aperiodischen Grenzfall und der in diesem Fall zur Verfügung stehende äußere Widerstand, durch den das Galvanometer geschlossen wird.

Die Justierung der Drehspulengalvanometer geschieht meist mit Hilfe einer auf dem Grundbrett des Instruments angebrachten Dosenlibelle, die so justiert sein muß, daß die Spule sich in der richtigen Lage befindet, wenn die Libelle einspielt.

Nach länger dauernden großen Ausschlägen zeigen die Instrumente häufig eine Nullpunktsänderung infolge elastischer Nachwirkung des Aufhängedrahtes. Bei kleinen Ausschlägen tritt dieser Übelstand nicht ein.

Die Instrumente lassen sich leicht auf einen bestimmten Teilstrich der Skala einstellen durch Drehen an einem „Torsionskopf" (T), der sich am oberen Ende des Aufhängedrahtes befindet.

Die größte bis jetzt erreichte „normale" Stromempfindlichkeit (128) entsprechend einer Richtkraft von $D = 0{,}6$ CGS ist etwa $\varepsilon_0 = 15$. Empfindliche Instrumente für 1 Ω äußeren Widerstand sind zurzeit noch nicht vorhanden (s. die Bemerkungen über den Widerstand der Zuleitung). Dagegen gibt es schon recht empfindliche Instrumente für 10 bis 20 Ω (vgl. Jaeger, Zeitschr. Instrk. 1908, S. 206), die für Kompensationsapparate von kleinem Widerstand geeignet sind. Die Schwingungsdauer beträgt, wenn man von den ballistischen Instrumenten absieht, meist 5 bis 7 s. (Über ein Instrument mit kurzer Schwingungsdauer siehe Diesselhorst, Zeitschr. Instrk. 1911, S. 247 und 276.)

Abb. 37a. Drehspulengalvanometer mit Weicheisenkern.

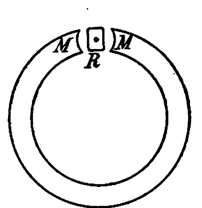


Abb. 37b. Drehspulengalvanometer mit eisenloser Spule.

Bei 5 s Schwingungsdauer (halbe Periode) und 2 m Skalenabstand kann bei diesen Instrumenten zurzeit etwa ein Ausschlag von 5—6 Skalenteilen für 1 μV erreicht werden, falls der Widerstand zwischen den Klemmen auf etwa 10 Ω verringert ist. Mittels der angegebenen Formeln läßt sich leicht die Empfindlichkeit für andere Fälle angenähert berechnen. Zweifellos sind noch weitere Fortschritte auf diesem Gebiet zu erreichen und zu erwarten.

Auch als ballistische Galvanometer werden die Drehspuleninstrumente gebaut und sind auch hier am brauchbarsten im aperiodischen Grenzzustand (Diesselhorst Ann. d. Phys. (4) Bd. 9, S. 458, 1902 und Jaeger Bd. 21, S. 81, 1906).

Die Empfindlichkeit des Drehspulengalvanometers läßt sich nicht in so einfacher Weise verändern wie diejenige der Nadelgalvanometer. Es werden für diesen Zweck zwar Instrumente mit magnetischem Nebenschluß geliefert, durch den der Wert von M verändert werden kann. Dadurch werden aber auch die Konstanten des Instruments mit Ausnahme der Schwingungsdauer geändert. Am besten verwendet man Instrumente mit mehreren Einsätzen. Von Hartmann und Braun werden auch Spulen mit zwei Wicklungen hergestellt.

Da es für die Beobachtung am bequemsten ist, im aperiodischen Grenzzustand zu arbeiten, verringert man die Empfindlichkeit des Galvanometers zweckmäßig nicht durch Vorschalten eines Widerstandes, sondern dadurch, daß man es durch einen Widerstand schließt, der den Grenzzustand herbeiführt, und daß man von einem Teil dieses Widerstandes die Zuleitungen zu dem äußeren Stromkreis abzweigt.

(138) Saitengalvanometer. Eine Abart der Drehspulengalvanometer ist das Einthovensche Saitengalvanometer (Ann. d. Phys. (4) Bd. 12, S. 1059, 1903). In dem Feld eines sehr kräftigen Elektromagnets befindet sich ein versilberter Quarzfaden, der an beiden Enden eingeklemmt ist und bei Stromdurchgang eine Ausbiegung erfährt; diese wird mit einem Mikrometer-Mikroskop gemessen. Man erhält eine große Stromempfindlichkeit und sofortige Einstellung bei allerdings sehr hohem Galvanometerwiderstand. Die Stromempfindlichkeit, welche hier nicht durch einen Ausschlagwinkel, sondern durch eine Verschiebung gemessen wird, wird zu 10^{-12} A angegeben bei einem Widerstand von 10000 bis 20000 Ω.

Zeigergalvanometer.

(139) Arten der Zeigergalvanometer. Die Praxis verlangt direkt zeigende Apparate mit einer zeitlich unveränderlichen Empfindlichkeit, an denen man direkt die Größe von Strom oder Spannung, die man zu messen wünscht, abliest. Man hat sowohl Spulengalvanometer wie Nadelgalvanometer für diesen Zweck brauchbar gemacht. Galvanometer sind ihrer Natur nach Strommesser; man kann sie aber, wenn sie genügend empfindlich sind, durch Vorschalten eines größeren konstanten Widerstandes auch zur Messung von Spannungen brauchbar machen.

(140) Nadelapparate. Hierhin gehört das älteste die Stromstärken in Ampere messende Instrument, das Torsionsgalvanometer von Siemens (132). Es ist jetzt von den bequemeren und genaueren Drehspulen-Apparaten verdrängt worden.

Eine wichtige Rolle in der Praxis spielen die sog. Weicheisenapparate. Im Magnetfeld einer festen Spule ist ein bewegliches Weicheisenstück meist drehbar angeordnet. Durchfließt ein Strom die Spule, so wird das Weicheisenstück magnetisiert und in die Stellen größter magnetischer Kraftliniendichte gedreht. An dem Weicheisenstück ist ein Zeiger befestigt, der über einer Skala schwingt. Die Apparate werden meist mit horizontaler Drehachse als Schaltbrettapparate gebaut; die Richtkraft bildet die Schwere oder eine Spiralfeder. Als Dämpfung wird am besten eine Luftdämpfung benutzt, darin bestehend, daß ein mit dem beweglichen System verbundener Flügel in einem möglichst abgeschlossenen Kasten schwingt. Die Skale ist nicht gleichmäßig; man hat aber durch geeignete Formengebung des Eisenstückes und der Spule in gewissen Grenzen ihre Gestalt in der Hand. Da es sich in der Regel um Schaltbrettapparate handelt, so wird die Skale so geteilt, daß man direkt die Spannung in Volt bzw. den Strom in Ampere abliest.

Infolge der Hysterese des Eisenkernes wird die Eichung im allgemeinen für wachsende und fallende Stromstärke in der Spule etwas verschieden ausfallen. Gleichstrom und Wechselstrom erfordern in der Regel etwas voneinander abweichende Skalen. Bei neueren Apparaten, die ausschließlich Federn als Richtkraft haben, ist von diesen Unterschieden nichts mehr zu merken.

(141) Drehspulengalvanometer. (136) Eine Kupfer- oder Aluminiumspule ist auf ein leichtes Kupferrähmchen (Dämpfung) gewickelt und dreht sich zwischen den Polen eines kräftigen Dauermagnetes. Ein zylindrisches Eisenstück zwischen den Polen läßt nur einen schmalen zylindrischen Luftraum frei, durch welchen sich die Spule frei bewegt. Die Spule trägt zwei Stahlspitzen (oft ohne durchgehende Achse), mit denen sie zwischen zwei Steinen (Rubinen) ruht. Die Stromzuführungen werden von zwei flachen Spiralfedern gebildet, die gleichzeitig die Richtkraft für das bewegliche System abgeben. Nur bei sehr empfindlichen Apparaten wird die Spitzenlagerung durch eine kurze Fadenaufhängung ersetzt (S. & H. und Mohs, Phys. Zeitschr., Bd. 11, S. 55. 1910, H. & Br.).

Der Magnet sowohl wie die Federn dürfen zeitlich ihre Stärke nicht verändern, weil sich sonst die Eichung des Apparates ändert. Der Zeiger ist bei den sogenannten Präzisionsapparaten messerartig zugeschärft und schwingt dicht über einer Skale, zu der parallel ein Spiegelstreifen angeordnet ist. Letzterer ist angebracht, um eine

Parallaxe bei der Ablesung zu vermeiden. Die Skale besitzt bei fast allen Präzisionsapparaten 150 annähernd einander gleiche Intervalle; die zu messende Stromstärke erhält man in der Regel durch Multiplikation der abgelesenen Skalenteile mit einer Zahl K, der „Konstanten" des Apparates; z. B. ist die Konstante des häufig gebrauchten Milliamperemeters $^1/_{1000}$. Bei gut gebauten Drehspulenapparaten erfolgt die Einstellung fast aperiodisch und mit großer Schärfe; die Ablesungen sind ohne Schwierigkeit bis auf 0,1 Skalenteile ausführbar. Da sich die Spule in einem starken Magnetfelde befindet, so sind die Apparate gegen äußere Magnetfelder verhältnismäßig unempfindlich. Das Erdfeld pflegt gerade noch merkbar zu sein; zuweilen wird durch einen Pfeil angedeutet, welche Richtung in den Meridian gebracht werden soll.

Schaltet man vor einen derartigen empfindlichen Strommesser einen größeren Widerstand aus Manganin, so wird er zu einem Spannungsmesser (178b).

Größere Ströme können schon wegen der Zuführungen des Stromes durch die flachen Spiralfedern nicht direkt in den Meßapparat eingeführt werden; man benutzt daher einen Nebenschluß (177).

Unter den im Handel erhältlichen empfindlichen Apparate mit Spitzenlagerung sind weit verbreitet:

Zahl der Teilstriche	Meßbereich	Widerstand
150	60 mV	2 Ω
150	45 mV	10 Ω

Die Drehspulenapparate werden vielfach auch als Schaltbrettapparate mit direkt ablesbarer Skale ausgeführt. Zuweilen wird, um Platz zu sparen, der Zeiger am Ende rechtwinklig umgebogen, so daß der über der Skale spielende Teil parallel zur Drehachse steht; die Skale bildet ein zylinderförmig gebogenes schmales Band (Profilinstrumente, s. ETZ 1915, S. 28).

Literatur: Handbuch der Elektrotechnik II, 4—6 von R. O. Heinrich und D. Bercovitz. Ferner Hausrath, Die Galvanometer. Helios 1909, S. 133, 173—269; Brion, Helios 1909, S. 1—49. Über Temperaturkompensation ETZ 1910, S. 1219; 1911, S. 299 u. 482, 700.

Differentialgalvanometer.

(142) Verwendung. In denjenigen Fällen, wo man die Gleichheit zweier Ströme untersuchen oder eine geringe Ungleichheit derselben mit großer Schärfe messen will, kann man ein Galvanometer mit zwei gleichen Wicklungen verwenden, durch die man die zu vergleichenden Ströme in entgegengesetzten Richtungen sendet. Der Ausschlag ergibt die Differenz der zu vergleichenden Ströme, wenn man die Angaben des Instruments in absolutem Maße kennt; dazu ist erforderlich, daß man das Galvanometer als einfaches Instrument mit nur einer von beiden Windungslagen eicht. Methoden, bei denen das Differentialgalvanometer verwendet werden kann, werden hierdurch meist sehr bequem und geben bei richtig gewählter Anordnung sehr genaue Resultate.

Ausführung. Als Differentialgalvanometer kann man jede beliebige Form des Galvanometers benutzen, wenn man ihm zwei gleiche Wicklungen gibt. Die Drähte sollen miteinander aufgewunden werden, d. h. jede Galvanometerrolle soll beide Drähte nebeneinander enthalten; andernfalls entstehen bei aufgehängten Magnetnadeln leicht seitliche Bewegungen der letzteren.

Statt zwei Wicklungen von gleicher Wirkung zu nehmen, kann man auch solche Spulen verwenden, deren Wirkungen in einem bekannten Verhältnis stehen, oder kann einer Wicklung einen passenden Nebenschluß geben.

Prüfung eines Differentialgalvanometers. Verbindet man die beiden Windungen hinter- und gegeneinander, so muß die Nadel auch bei den stärksten Strömen, die bei der Verwendung des Instrumentes vorkommen, in Ruhe bleiben. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so kann man die Wirkung etwa

durch Zusatzwindungen, die man der schwächeren Spule zufügt, gleichmachen. In manchen Fällen ist gleiche Wirkung der Spulen nicht erforderlich, z. B. bei der Widerstandsmessung nach der Kohlrausch schen Methode des übergreifenden Nebenschlusses; in diesem Fall ist es auch nicht nötig, daß beide Spulen gleichen Widerstand besitzen (Jaeger, Zeitschr. Instrk. 1904, S. 288).

Wahl eines passenden Galvanometers.

(143) Die Wahl des zu einer Messung zu benutzenden Galvanometers hängt von der Genauigkeit ab, die man zu erreichen wünscht.

Wenn diese nicht größer als etwa 1°/₀₀ ist, kann man vorteilhaft die sehr bequemen Zeigerinstrumente anwenden, welche direkt die zu messende Größe abzulesen gestatten (Präzisionsamperemeter, -voltmeter usw. (141).

Auch für noch größere Meßgenauigkeit kommt man häufig bei Anwendung von Nullmethoden noch mit Zeigergalvanometern aus, besonders wenn solche mit aufgehängtem System benutzt werden.

Zu den im Gebrauch oft unbequemen Spiegelgalvanometern wird man nur dann greifen, wenn man eine größere Genauigkeit wünscht, oder die vorhandenen Zeigergalvanometer für den beabsichtigten Zweck nicht ausreichen (Messung sehr kleiner Ströme, Spannungen usw.).

Wenn es sich darum handelt, die Empfindlichkeit eines Galvanometers möglichst auszunutzen, so muß man die Meßmethoden hinsichtlich der Widerstandsanordnung usw. danach einrichten oder bei gegebenen Anordnungen eine passende Schaltung des Galvanometers wählen oder z. B. bei Drehspulengalvanometern unter mehreren das den Widerstandsverhältnissen der Anordnung am meisten entsprechende wählen. Man muß im allgemeinen möglichst danach streben, der Meßanordnung einen so kleinen Widerstand zu geben als möglich, weil dann die Spannungsempfindlichkeit des Galvanometers, welche für die Meßgenauigkeit bestimmend ist, am größten wird. Näheres hierüber siehe z. B. Jaeger, Zeitschr. Instrk., Bd. 26, S. 69, 1906.

Für ballistische Messungen sind Galvanometer von großer Schwingungsdauer (ungedämpfte halbe Periode etwa 10 s und mehr) zu wählen, weil sonst der Umkehrpunkt nicht mit Sicherheit abzulesen ist. Auch ist es nötig, daß der ganze Stromstoß abgelaufen ist, ehe das bewegliche System eine merkliche Bewegung angenommen hat.

Galvanometer von großem Widerstand finden z. B. bei Isolationsmessungen oder beim Arbeiten mit einem Kompensationsapparat von großem Widerstand Anwendung.

Dynamometer.

(144) Das Elektrodynamometer (W. Weber) besteht aus zwei stromdurchflossenen Spulen (oder Spulensystemen), von denen die eine fest steht, die andere beweglich ist. Werden die feste und bewegliche Spule bzw. von den Gleichströmen I und i durchflossen, so ist die Kraft (Anziehung oder Abstoßung), die sie aufeinander ausüben, gleich $K I i$. Dabei hängt K von den Windungszahlen und der geometrischen Lage der Spulen zueinander ab. Schaltet man beide Spulen hintereinander, so daß sie also von demselben Strom I durchflossen werden, so ist die Kraft, die sie aufeinander ausüben, gleich $K I^2$, d. h. proportional dem Quadrat der Stromstärke; diese Eigenschaft macht das Dynamometer zur Messung von effektiven Wechselstromstärken geeignet (202).

Beim absoluten Dynamometer kann man die Konstante K aus den geometrischen Abmessungen und der gegenseitigen Lage der Spulen berechnen, somit den Strom im absoluten Maß bestimmen (z. B. Wage nach Lord Rayleigh, das Helmholtz sche absolute Dynamometer vgl. Wied. Ann. Bd. 59, S. 532, 1896). Diese Apparate kommen für den technischen Gebrauch nicht in Frage.

(145) Stromwage. Torsionsdynamometer. Nach der Ablenkung durch den Strom werden die beiden Spulen durch geeignete Vorrichtungen in ihre ursprüngliche Lage zueinander zurückgeführt; in dieser wird dann die Kraftwirkung gemessen; d. h. K ist eine Konstante, deren Wert experimentell bestimmbar ist. Die Größe der Kraft wird entweder durch Gewichte (Stromwagen) oder durch Torsionsfedern (Torsionsdynamometer) gemessen. Beide Apparategattungen sind heutzutage als veraltet anzusehen. Eine neuere Form bei Drysdale, Electrician Bd. 76, S. 523, 558, 593, 714.

(146) Spiegeldynamometer dienen zur Erzielung größerer Empfindlichkeit. Das bewegliche System wird nicht in seine ursprüngliche Gleichgewichtslage zurückgeführt, sondern es wird der Ausschlagswinkel beobachtet. Da letzterer in der Regel nur klein ist, so bleibt K nahezu eine Konstante, namentlich wenn die Wicklungen der Spulen geeignet ausgeführt werden (vgl. O. Frölich, Theorie des kugelförmigen Elektrodynamometers, Pogg. Ann. Bd. 143, S. 643, 1871, in neuer Form ausgeführt von Siemens & Halske. — Dynamometer von F. Kohlrausch, Wied. Ann. Bd. 11, S. 653, 1880; 15, S. 550, 1882, ausgeführt von Hartmann & Braun).

(147) Zeigerapparate. Bei denjenigen Dynamometern, bei welchen die bewegliche Spule nicht in ihre ursprüngliche Lage zurückgeführt wird und die Ausschlagswinkel größer sind, ist K vom Ausschlagwinkel abhängig; hierher gehören die als Spannungs-, Strom- und Leistungsmesser ausgebildeten Zeigerapparate, die somit eine empirisch geteilte Skale besitzen. Diese Apparate sind für Wechselstrommessungen von großer praktischer Wichtigkeit geworden; s. Wechselstrommessungen (202, 203).

Über Bau und Anwendung der Induktionsmeßgeräte, die nur auf Wechselstrom ansprechen, s. (208).

Das Telephon als Meßinstrument für Wechselströme; Vibrationsgalvanometer.

(148) Das Hörtelephon ist als empfindliches Nullinstrument bei Wechselstrommessungen verwendbar, z. B. an Stelle des Galvanometers im Brückenzweig einer von Wechselstrom durchflossenen Wheatstoneschen Brücke. Über seine Anwendung vgl. die Messung von elektrolytischen Widerständen (175), Induktivitäten (188, 189) und Kapazitäten (192 ff.). Über die Empfindlichkeit von Telephonen s. M. Wien, Ann. d. Phys. (4) Bd. 4, S. 450, 1901; Bd. 18, S. 1049, 1905. Arch. f. Physiol. Bd. 97, S. 1, 1903.

Über das optische Telephon von M. Wien s. Wied. Ann. Bd. 42, S. 593; Bd. 44, S. 681, 1891.

(149) Die Vibrationsgalvanometer sind Nadel- oder Spulengalvanometer, deren bewegliche Systeme ein kleines Trägheitsmoment und eine hohe Richtkraft besitzen, so daß sie eine verhältnismäßig große Eigenfrequenz der mechanischen Torsionsschwingungen besitzen. Wird durch die Spulen des Galvanometers ein Wechselstrom geschickt, so gerät das bewegliche System, falls die Frequenz des Wechselstromes mit der Eigenfrequenz des beweglichen Systems übereinstimmt, in starke Schwingungen. Bei starker Verstimmung dagegen bleibt das bewegliche System nahezu in Ruhe (Resonanzinstrument).

Um die Schwingungen beobachten zu können, läßt man das Licht eines Spaltes oder eines Glühfadens auf einen am beweglichen System befestigten Spiegel fallen, und projiziert die zurückgeworfenen Strahlen auf einen Schirm oder betrachtet sie in einem Fernrohr. Gerät das System in Schwingungen, so wird das Bild in ein breites Band auseinandergezogen.

Die Vibrationsgalvanometer werden meistens als „Nullinstrumente" gebraucht, d. h. es wird auf verschwindenden Strom eingestellt. Um eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erzielen, muß eine Vorrichtung vorhanden sein, um die

Eigenfrequenz zu verändern und auf die Frequenz des erregenden Wechselstromes abstimmen zu können.

Auf dem Prinzip der Nadelgalvanometer beruhen die Vibrationsgalvanometer von Rubens (Wied. Ann. Bd. 56, S. 27, 1896), M. Wien (Ann. d. Phys. (4) Bd. 4, S. 442, 1901) und Schering (ETZ 1918, S. 410).

Bei den als Vibrationsgalvanometern dienenden Spulengalvanometern tritt ähnlich wie bei den Oszillographen an die Stelle der Spule ein bifilares Band, das zwischen den Polen eines Dauermagnetes hindurchgezogen ist. Länge und Spannung der Bänder bestimmen die Eigenfrequenz. (Campbell, Phil. Mag. (6) Bd. 14, S. 494, 1907; Duddell, ebenda Bd. 18, S. 168, 1909; Schering u. Schmidt, Arch. f. Elektrot. Bd. 1, S. 254, 1912.)

Über die Theorie s. Zöllich, Arch. f. El. Bd. 2, S. 369 u. Bd. 3, S. 369.

Über Vibrationselektrometer: Greinacher, ETZ 1913, S. 1485 und Curtis, Bull. Bur. of Stand. 11, S. 535, 1915.

Elektrokalorimeter.

(150) Hitzdrahtinstrumente. Die Erwärmung eines Drahtes durch den Strom läßt sich zur Messung des letzteren benutzen. Hat man nicht zu besorgen, daß im Widerstandsdraht eine merkliche Hautwirkung (99,3) auftritt, so ist die Erwärmung durch Gleich- und Wechselstrom dieselbe. Abgesehen von sekundären Störungen sind also Elektrokalorimeter Apparate, welche mit Gleichstrom geeicht bei Gebrauch mit Wechselstrom richtige Angaben machen. Die einzelnen Apparategattungen unterscheiden sich durch die Art und Weise, wie die Stromwärme gemessen wird.

a) Hartmann & Braun benutzt in seinen Hitzdrahtapparaten die Verlängerung des Drahtes. Der zu messende Strom durchfließt einen Platiniridiumdraht (in älteren Apparaten einen Platinsilberdraht) *A B* (Abb. 38 a); an einem mittleren Punkte des letzteren greift seitlich ein zweiter Draht *C E* an, dessen Ende an der Grundplatte befestigt ist; ein dritter sehr feiner Draht *DF*, dessen Ende in der Mitte des zweiten Drahtes angreift, führt über eine Rolle *R* und wird an seinem andern Ende durch eine Feder gespannt erhalten. Erwärmt sich der erste Draht, so wird sein mittlerer Punkt und derjenige des zweiten Drahtes zur Seite gezogen, die Rolle und der mit dieser verbundene Zeiger *Z* dreht sich. Der Strommesser wird in Verbindung mit Abzweigwiderständen bis zu hohen Stromstärken gebaut. Bei den Apparaten mit Platiniridiumdrähten werden die Hitzdrähte bis zu bedeutend höheren Temperaturen beansprucht; der Hauptvorteil dieses Materials besteht darin, daß keine Nullpunktswanderungen mehr auftreten (ETZ 1910, S. 268).

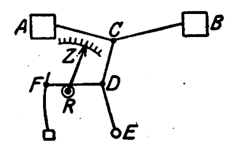


Abb. 38 a. Hitzdrahtstrommesser.

Bei den Apparaten zur Messung von Hochfrequenzströmen ist eine größere Zahl von parallel geschalteten breiten, dünnen Hitzbändern symmetrisch zwischen zwei parallelen Ringen ausgespannt (ETZ 1911, S. 1134; Jahrb. d. drahtl. Tel. Bd. 5, S. 1912).

Hitzdrahtspiegelinstrumente: Friese (ETZ 1895, S. 726, s. auch S. 784, 812); Fleming (Phil. Mag. Ser. 6, Bd. 7, S. 595, 1904).

b) Messung durch Widerstandserhöhung (Barretter). Der Hitzdraht bildet einen Zweig einer Wheatstoneschen Brücke, deren übrige Zweige aus einander gleichen Widerständen und Drosselspulen bestehen. Im Hauptzweig ist eine Hilfs-Gleichstromquelle, im Brückenzweig ein Galvanometer eingeschaltet. Legt man nun an den Zweig mit dem Hitzdraht eine Wechselstromquelle, so kann der Wechselstrom wegen der Drosselspulen nicht in die anderen Zweige treten,

er erwärmt also nur den Hitzdraht und stört dadurch das Gleichgewicht der Brücke. Die Empfindlichkeit der Barretter kann sehr groß gemacht werden. Fessenden, ETZ 1902, S. 586 ff. B. Gati, El. World Bd. 47, S. 1341, 1906. Phys. Z. Bd. 10, S. 897, 1909. K. E. F. Schmidt, Phys. Z. 1906, S. 642; 1907, S. 601. Dynamobolometer von Paalzow und Rubens (Wied. Ann. Bd. 37, S. 529, 1889). Tissot, J. phys. Bd. 3, S. 525, 1904.

c) Man kann auch thermoelektrische Kräfte benutzen, indem man in jeden der vier Zweige einer Wheatstoneschen Brücke ein (oder mehrere) Thermoelemente 1—4 schaltet (Abb. 38b), von denen je eine Lötstelle an einen dicken Metallklotz gelötet ist, so daß sie konstante Temperatur besitzt. Haben alle vier Zweige den gleichen Widerstand, so gelangt kein Wechselstrom in den Brückenzweig. Andrerseits ist die Richtung der Thermokräfte so gewählt, daß sie durchweg einen Gleichstrom derselben Richtung in den Brückenzweig schicken, der dort mit einem passenden Gleichstrominstrument G gemessen wird (Salomonson, Phys. Zeitschr. Bd. 7, S. 463, 1906). Durch Anwendung sehr feiner Drähte und Einschließen derselben in ein Vakuum kann eine sehr große Empfindlichkeit erreicht werden (Schering, Zeitschr. Instrk. Bd. 32, S. 69, 101, 1912). Technische Apparate nach diesem Prinzip von Guggenheimer (ETZ 1912, S. 73—74, 94—96); einfacher Gerlach, Helios Bd. 19, S. 63, 1913.

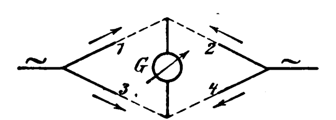


Abb. 38 b. Strommessung durch Thermoelemente.

Bei dem Thermogalvanometer von Duddell (Electrician Bd. 56, S. 559, 1906) bildet eine ein Thermoelement enthaltende Drahtschleife das bewegliche System eines Spulengalvanometers. Das Thermoelement wird von außen durch Heizwiderstände, die von dem zu messenden Strom durchflossen werden, erwärmt.

Elektrometer.

(151) Das Elektrometer benutzt zur Messung die mechanischen Kräfte, welche ruhende Elektrizitätsmengen aufeinander ausüben. Diese Kräfte sind von den Spannungen zwischen den einzelnen Teilen abhängig, sie sind auch bei hohen Spannungen sehr klein; infolgedessen sind die Elektrometer meist von sehr empfindlicher Konstruktion und erfordern große Umsicht und peinliche Sorgfalt in der Behandlung. Sie eignen sich deshalb mehr zu Instrumenten für wissenschaftliche Laboratorien als für technische Messungen, sind aber für gewisse Messungen unentbehrlich.

Das Schutzring-Elektrometer besteht aus zwei ebenen, wagrechten Platten, von denen die untere, größere feststeht, während die obere, kleinere aufgehängt ist; außerdem wird die obere Platte durch eine feststehende Ringplatte zu der Größe der unteren ergänzt. Die bewegliche Scheibe erfährt eine Anziehungskraft $= \frac{S}{8\pi}\left(\frac{V-V_0}{a}\right)^2$, worin S die Größe der beweglichen Scheibe, a den Abstand und $V-V_0$ die Spannung zwischen den beiden Scheiben bedeutet.

Das Quadrantenelektrometer enthält vier isolierte Quadranten (scheiben- oder schachtelförmig), von denen je zwei gegenüberliegende leitend miteinander verbunden werden; ober- oder innerhalb der Quadranten schwebt eine leichte Nadel von der Form einer 8 (Biskuit genannt), welche von den Quadranten isoliert ist. Das Ganze wird von einem möglichst allseitig geschlossenen metallischen Gehäuse umgeben.

Die Ladung wird der Nadel entweder durch ein Gefäß mit Schwefelsäure mitgeteilt, in das ein an der Nadel unten befestigter Platindraht taucht, oder da-

durch, daß ein leitender Aufhängefaden benutzt wird. Hierfür kommen in Betracht feine Metallfäden (z. B. W. Thomson, Hallwachs, Wied. Ann. Bd. 29, S. 1, 1886) oder Quarzfäden, die einen metallischen Überzug erhalten haben (Boys) oder durch Eintauchen in eine Salzlösung leitend gemacht sind (Dolezalek, Zeitschr. Instrk. Bd. 21, S. 354, 1901). Für Wechselstrommessungen ist letztere Aufhängung wegen des großen Widerstandes des Fadens nicht zulässig (vgl. Zeitschr. Instrk. 1904, S. 143).

Es wird Flüssigkeitsdämpfung und für empfindlichere Apparate Luftdämpfung angewandt; Dämpferflügel und Dämpfergehäuse müssen auf demselben Potential sein.

Bei Messungen statischer Potentiale wird das Gehäuse meist an Erde gelegt; die Isolation (Bernstein) muß möglichst vollkommen sein. Bei Messungen dynamischer Potentiale, die für technische Zwecke in Frage kommen, brauchen diese beiden Bedingungen nicht erfüllt zu sein.

(152) Messungen mit dem Quadrantenelektrometer. Die allgemeine Formel für die Ablenkung eines Quadrantenelektrometers lautet (Zeitschr. Instrk. 1903, S. 97):

$$\alpha = K \frac{(V_1 - V_2)\,(V_n - {}^1/_2\,(V_1 + V_2))}{1 + a\,(V_n - V_1)\,(V_n - V_2) + b(V_1 - V_2)^2}.$$

Darin bedeuten V_n, V_1, V_2 die Potentiale, auf denen sich Nadel und Quadrantenpaare befinden, gemessen gegen das Potential des Gehäuses. Über den Einfluß der Kontaktpotentiale s. Hallwachs (Wied. Ann. Bd. 29, S. 1, 1886). Durch geeignetes Kommutieren kann der Einfluß der Kontaktpotentiale beseitigt werden; gleichzeitig wird dadurch für die einzelnen Anwendungen die Formel vereinfacht.

Die Empfindlichkeit der Elektrometer ist abhängig von Länge, Durchmesser und Material der Fäden, Höhe der Quadrantenschachtel, Form und Größe der Nadel.

1. Quadrantenschaltung. Die Nadel wird auf ein hohes Potential gebracht (Hilfspotential, Akkumulatorenbatterie an Nadel und Gehäuse). Die zu messende Potentialdifferenz wird an die Quadrantenpaare gelegt, von denen das eine mit dem Gehäuse verbunden ist. Die Ablenkung ist proportional der zu messenden Potentialdifferenz; die Empfindlichkeit ist abhängig von der Höhe des Hilfspotentials der Nadel. Die Methode eignet sich vornehmlich zur Messung kleiner Potentialdifferenzen.

2. Nadelschaltung. Die beiden Quadranten werden auf entgegengesetzt gleiche Potentiale (Hilfspotentiale) gebracht, z. B. das eine Paar mit dem positiven, das andere mit dem negativen Pole einer Batterie von $2n$ Elementen verbunden; die Stelle zwischen dem $n$ten und dem $(n+1)$ten Element ist mit dem Gehäuse verbunden. Die Nadel wird auf das zu messende Potential gebracht. Die Ablenkungen der Nadel sind dem letzteren proportional.

3. Doppel- oder idiostatische Schaltung. Das eine Quadrantenpaar wird mit dem Gehäuse verbunden, das andere Paar und die Nadel auf das zu messende Potential gebracht. Die Ablenkungen der Nadel sind angenähert dem Quadrate des letzteren proportional. Diese Schaltung eignet sich vornehmlich zur Messung höherer Potentiale.

Über die Anwendung des Quadrantenelektrometers für Wechselstrommessungen (204, 205).

Binantenelektrometer besitzen zwei feststehende halbkreisförmige Binanten und eine in der Mitte geteilte Nadel. Die beiden Nadelhälften sind von einander isoliert. Die Theorie ist ähnlich derjenigen des Quadranten-Elektrometers. Ausführungsform von Dolezalek als Spiegel- und Zeigerapparat. Ann. d. Phys. (4) Bd. 26, S. 312, 1908.

Über Saitenelektrometer (Edelmann, München) s. Ztschr. Instrk. 1907, S. 291 und Lutz, Phys. Ztschr. Bd. 9, S. 642, 1908.

(153) Direkt zeigende technische Elektrometer dienen in der Regel zur Spannungsmessung und bestehen aus einem festen und einem beweglichen Plattensystem, die voneinander isoliert sind und die beiden Pole des Instrumentes bilden. Das bewegliche System trägt den Zeiger für die Skale und ist entweder an einem Metallfaden aufgehängt (z. B. Multizellularvoltmeter von Lord Kelvin für Spannungen von 100—1000 V; Hartmann & Braun) oder in Spitzen gelagert, die gleichzeitig zur Zufuhr der Ladung des Systems dienen. Die Skale wird empirisch gefunden. Schaltbrettapparate der AEG., S. & H., H. & Br. für Spannungen von 1000—10 000 V, für höhere Spannungen Vorschaltkondensatoren. A. Franke, Wied. Ann. Bd. 50, S. 163, 1893. Peukert, ETZ, Bd. 1898, S. 657 und Bd. 1901, S. 265. Szilard, ETZ 1914, S. 537. Dieckmann, Phys. Ztschr. 13, S. 108.

(154) Elektrometer für sehr hohe Spannungen. Ebert und Hoffmann (Ztschr. Instrk. 1898, S. 1). Zwischen den Platten eines Luftkondensators, die an die zu messende Potentialdifferenz angelegt werden, ist unter 45° Neigung zu den Platten an einem feinen Faden ein dünnes Aluminiumblech gehängt. — Elektrostatische Wage von Cremieu und Müller (Ann. d. Phys. (4) Bd. 28, S. 585, 1909. Um ein Überschlagen von Funken zwischen den einander anziehenden Metallteilen zu verhindern, wird als Dielektrikum entweder Öl (A. Grau, ETZ, Bd. 1905, S. 269 und Jona, ETZ 1906, Bd. 27, S. 295. Westinghouse Gesellschaft, Electrician 55, S. 705, 1905. Siemens & Halske) oder Preßluft (Tschernyscheff, Phys. Ztschr. 1910, Bd. 11, S. 445) verwendet, ferner Abraham u. Villard, J. phys. 1911, Bd. 1, S. 525.

(155) Auch das Goldblattelektroskop ist als Meßinstrument ausgebildet, indem man an einer Skale die Divergenz der Blättchen abliest (Exnersches Elektroskop, verbessert von Elster und Geitel, Phys. Ztschr. Jahrg. 4, S. 137; vgl. auch Braun, Wied. Ann. 1887, Bd. 31, S. 856).

Über Lippmannsche Kapillarelektrometer s. Pogg. Ann. Bd. 149, S. 546, 1873. Literatur bei Ostwald-Luther, Physiko-chemische Messungen. 3. Aufl. Leipzig 1910.

Registrierapparate.

(156) Alle Arten von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessern können zu Registrierapparaten gemacht werden, indem an dem Zeiger des Meßapparates eine Schreibfeder befestigt wird, welche auf einem von einem Uhrwerk bewegten Papierstreifen die Stellungen des Zeigers in Abhängigkeit von der Zeit aufschreibt. Da durch das Ausfließen der Tinte und das Aufliegen der Feder reibende Kräfte entstehen, so sind nur diejenigen Apparate für diese Art Registrierung zu brauchen, welche eine starke Richtkraft besitzen. Aus diesem Grunde sind besonders Ferrarisapparate für diesen Zweck geeignet (208). Die Uhrwerke für die Fortbewegung des Papierstreifens können so eingerichtet werden, daß ihnen verschieden große Geschwindigkeiten erteilt werden können.

Um die Reibung der Feder zu beseitigen, sind vornehmlich zwei Methoden im Gebrauch. Bei der ersten trägt der Zeiger keine Schreibfeder, sondern einen Metallstift, der von einem Bügel in kurzen gleichmäßigen Zeitintervallen gegen ein vor dem Registrierstreifen liegendes Farbband gedrückt wird. Nach Abheben des Bügels schwebt also der Zeiger wieder frei und kann sich neu einstellen.

Bei der zweiten Methode (Siemens & Halske) läßt man vermittelst eines kleinen Hilfsinduktors einen Funkenstrom vom Zeiger auf eine dahinterliegende Metallplatte überströmen; der Funkenstrom durchbohrt das Papier und hinterläßt eine feine Linie.

Die Registrierung mittels Photographie hat sich wenig eingebürgert.

Die Apparate mit drehbarem Zeiger haben die Unannehmlichkeit, daß sie die zu messende Größe nicht in geradlinigen, sondern in kreisförmigen Koordi-

naten aufzeichnen. Um geradlinige Koordinaten zu erhalten, benutzte Hartmann & Braun früher die Weicheisenapparate von F. Kohlrausch, bei denen ein Weicheisenzylinder in eine Spule mit vertikaler Achse gezogen wird.

Siemens & Halske (ETZ 1910, S. 172; 1915, S. 28) wendet bei seinen Drehspul- und Ferrarisapparaten eine eigentümliche Hebelübertragung an, durch welche sich die Spitze des Zeigers nahezu in einer geraden Linie bewegt. Namentlich für Ferrarisinstrumente ist die Registrierung in geradlinigen Koordinaten auch auf anderem Wege erreicht, z. B. H. & Br., ETZ 1913, S. 91; Keinath, Helios F 1913, S. 309 und E 1915, S. 585, 701, 722; ders. ETZ 1913, S. 91; 1915, S. 633, 651, 662, 679.

Voltameter.

(157) Das Voltameter mißt die Stärke der Ströme (Gleichströme) an ihrer Einwirkung auf zersetzbare Leiter; vgl. (67).

Das Voltameter dient zur Bestimmung der durch eine Leitung geflossenen Elektrizitätsmenge Q, kann aber auch zur Eichung anderer Strommesser verwendet werden. Allerdings werden zu diesem Zweck heute meistens Normalelemente in Verbindung mit Widerständen, bzw. ein Kompensationsapparat benutzt (180 bis 182).

Eine besondere Rolle spielt infolge der gesetzlichen Definition der Stromeinheit das Silbervoltameter (159).

Verbindung im Stromkreis. Die Kathode, an der das Metall niedergeschlagen (oder der Wasserstoff ausgeschieden wird), ist mit dem negativen Pol, d. h. beim Gebrauch von Elementen mit dem Zink, beim Gebrauch von Akkumulatoren mit dem Bleipol zu verbinden. Die Stromrichtung wird mit einer Magnetnadel oder mit einen Strommesser, aus dem die Stromrichtung ersichtlich ist, geprüft, oder die Pole werden durch Polreagenzpapier festgestellt. Der Stromkreis muß einen Schlüssel enthalten, mit dem man den Strom rasch und leicht schließen und öffnen kann.

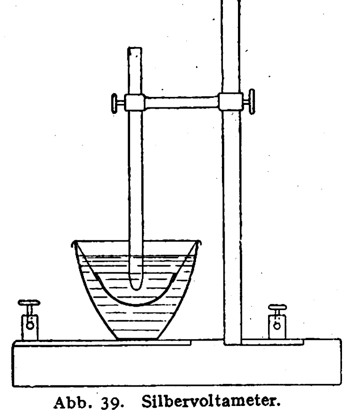


Abb. 39. Silbervoltameter.

Wasser- und Knallgasvoltameter.

Bei diesem Voltameter dient entweder die (durch Wägung bestimmte) Menge des zersetzten Wassers oder das Volumen des aufgefangenen Knallgases oder Wasserstoffs als Maß für die hindurchgegangene Elektrizitätsmenge. Als Zersetzungsflüssigkeit wird verdünnte, 10—20proz. Schwefelsäure verwendet.

(158) Das Wasservoltameter von F. Kohlrausch eignet sich in der Größe, wie es in der ETZ 1885, S. 190 beschrieben wurde, zur Messung von Strömen bis zu 30 A; es besitzt einen Widerstand von 0,03 Ω.

1 Coulomb entspricht 0,174 cm³ trockenes Knallgas von 0° und 760 mm Druck, 1 Amperestunde 626 cm³.

Näheres hierüber siehe Kohlrausch, Lehrbuch.

Metallvoltameter.

Man gebraucht als solche das Silbervoltameter, welches bei sorgfältiger Behandlung die sichersten Ergebnisse liefert, aber nur bei schwächeren Strömen angewendet zu werden pflegt, und das Kupfervoltameter, das bei stärkeren Strömen gebraucht wird, bei dem man aber gewisse Vorsichtsmaßregeln zu beobachten hat.

(159) Durch das **Silbervoltameter** ist die gesetzliche Stromeinheit (das Ampere) definiert, indem nach dem Gesetz vom 1. Juni 1898 das Ampere durch einen Silberniederschlag von 1,118 mg/s dargestellt wird. Zu dem Gesetz sind auch Ausführungsbestimmungen für die Darstellung des Ampere gegeben. Diese Festsetzung ist auf einem Internationalen Kongreß in London 1908 zur internationalen Annahme empfohlen worden. Im praktischen Gebrauch tritt an Stelle des Silbervoltameters neben den Normalwiderstand das Normalelement (162). Als Silbervoltameter benutzt man einen Silber-, Gold- oder Platintiegel, der mit Silberlösung (15—30 proz. Lösung von neutralem Silbernitrat) gefüllt auf eine blanke Kupferplatte gestellt wird. Letztere ist mit einer Klemmschraube verbunden, bei welcher der Strom austritt. In den Tiegel taucht von oben als Anode eine Silberstange, ohne den Boden oder die Wände des Tiegels zu berühren (Abb. 39), Kohlrauschsche Form. Damit von der Silberstange nicht Teilchen, die sich absondern, in den Tiegel fallen, bringt man unter der Stange im Tiegel ein kleines Glasschälchen an, das an einigen Glasstäbchen angeschmolzen ist und mittels der letzteren in den Tiegel eingehängt wird. Organische Substanzen als Umhüllung der Anode werden besser vermieden; gut ausgewaschene Seide scheint indes unschädlich zu sein. Statt des Platintiegels kann man auch ein Platinblech verwenden, das in irgend einem passenden Gefäß einem Silberblech gegenübergestellt wird. Die Kathode wird auf diese Weise leichter und billiger. Die Ränder des Bleches biegt man etwas nach der von der Anode abgewandten Seite um. An der Kathode bilden sich leicht lange nadelförmige oder verästelte Silberkristalle, welche Neigung haben, bis zur Anode herüberzuwachsen. Auf 1 A rechne man mindestens 50 cm² wirksame Kathodenfläche, 5 cm² Anodenfläche. Um einen guten, festhaftenden Metallniederschlag zu erzielen, kühle man die Zersetzungsstelle möglichst stark ab. Näheres hierüber siehe Kohlrausch, Lehrbuch; hinsichtlich sehr genauer Messungen mit dem Silbervoltameter vgl. z. B. auch Jaeger und von Steinwehr, Zeitschr. Instrk. 1908, S. 327 und 353.

(160) Beim **Kupfervoltameter** verwendet man als Anode ein mit elektrolytisch gefälltem Kupfer überzogenes oder aus solchem hergestelltes Blech; als Kathode stellt man diesem ein Kupferblech oder noch besser ein Platinblech gegenüber. Näheres hierüber siehe bei Förster, Zeitschr. Elektrochem. Bd. 3, S. 479, 1897.

(161) Messung mit dem Voltameter. Zeitdauer. Der Stromschluß soll nicht weniger als 1 Minute dauern. Die genauesten Resultate erhält man mit einem Chronographen, auf dem das Schließen und Öffnen des Stroms neben Sekundenmarken aufgezeichnet wird.

Zersetzte Menge. Bei Verwendung von Metallvoltametern suche man mindestens 0,5 g Metallniederschlag zu erzielen, falls die Genauigkeitsgrenze der Wage nicht einen noch größeren Niederschlag erfordert.

Normalelemente.

(162) Normalelemente werden aus chemisch reinen Stoffen nach genauen Vorschriften zusammengesetzt. Sie dürfen bei den Messungen stets nur mit äußerst schwachen Strömen beansprucht werden, damit keine erhebliche Polarisation eintritt. Haben die Elemente eine geringe Polarisation erfahren, so nehmen sie nach einiger Zeit wieder den normalen Wert an. (Jaeger, Ann. d. Phys. (4) Bd. 14, S. 726, 1904).

Die Normalelemente spielen eine wichtige Rolle, indem sie neben den Normalwiderständen bei praktischen Messungen die zweite elektrische Grundeinheit repräsentieren. Im Jahre 1908 wurde in London das Westonsche Element als Normalelement zur internationalen Annahme empfohlen. Nebenher findet auch das Clarkelement heute noch Anwendung, obwohl es im Gebrauch infolge seines großen Temperaturkoeffizienten von fast 1°/∞ für den Grad erheblich un-

bequemer als das Westonsche Element und daher jetzt durch dieses fast völlig verdrängt ist.

(Zusammenfassende Darstellung über Normalelemente siehe: Jaeger, Die Normalelemente und ihre Anwendung in der elektrischen Meßtechnik. 1902. Halle a. S., W. Knapp.)

(163) Das Normalelement von Clark besteht aus Quecksilber in Quecksilberoxydsulfat (Merkurosulfat) am positiven und amalgamiertem Zink in Zinksulfat am negativen Pol. Die EMK ist rund 1,433—0,0012 (t—15°) Volt. Das Element soll in den letzten 24 Stunden vor dem Gebrauch keine Temperaturschwankungen von mehr als 5° C durchgemacht haben. (Vgl. Kahle, Wied. Ann. Bd. 51, S. 174, 203. Bd. 67, S. 1.)

(164) Das Normalelement von Weston besteht aus Quecksilber oder amalgamiertem Platin in Quecksilberoxydsulfat und Kadmiumamalgam in Kadmiumsulfat. Es gibt zwei Formen; die der Physik.-Techn. Reichsanstalt, welche jetzt auch in mehreren anderen Ländern als Normal der Spannungseinheit angenommen ist, hat festes Kadmiumsulfat im Überschuß (amtlich jetzt Weston sches Element genannt), während von der Weston-Instrument-Co. auch Elemente mit bei 4° C gesättigter Kadmiumsulfatlösung ausgegeben werden, die praktisch keine Änderung der Spannung mit der Temperatur zeigen. Da zwischen diesen beiden Typen bei Zimmertemperatur eine Spannungsdifferenz von etwa 0,4‰ besteht (das Element mit der ungesättigten Lösung hat die höhere Spannung), so muß man bei genaueren Messungen darauf achten, welchem Typus das verwendete Element angehört. Beide Formen werden von der Physikal.-Techn. Reichsanstalt geprüft.

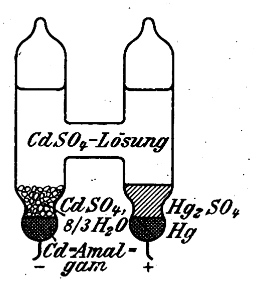


Abb. 40. Westonsches Normalelement.

Das Element hat gewöhnlich **H**-Form (Abb. 40); zwei unten geschlossene senkrechte Röhren sind durch ein wagrechtes Rohr verbunden. In die Böden der senkrechten Röhren sind kurze Platindrähte eingeschmolzen; der eine dieser Drähte ist mit Kadmiumamalgam von 12½% Cd, der andere mit Quecksilber bedeckt; auf dem ersteren liegt bei der Form der Reichsanstalt eine Schicht Kadmiumsulfatkristalle, auf dem letzteren die Paste aus dem Quecksilbersalz (Merkurosulfat), metallischem Quecksilber, Kadmiumsulfatkristallen und einer Lösung von Kadmiumsulfat; dann wird das Element mit einer konzentrierten Kadmiumsulfatlösung gefüllt und die oberen Enden der Röhren verschlossen, am besten abgeschmolzen. Bei dem Element mit ungesättigter Lösung fehlen die Kristalle von Kadmiumsulfat.

Nach den neusten internationalen Vereinbarungen (ETZ 1910, S. 1303) wird als Spannung des Westonschen Elements bei 20° 1,0183 int. Volt angenommen. In der Nähe von 20° berechnet sich die Spannung angenähert als

$$E_t = E_{20} - 0{,}00004\ (t - 20°).$$

Die Spannung des Elementes mit ungesättigter Lösung ist unabhängig von der Temperatur gemäß obiger Festsetzung etwa 1,0187 int. Volt.

Näheres über dieses wichtige Element besonders auch wegen des Merkurosulfats siehe noch in den Tätigkeitsberichten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt aus den letzten Jahren (Zeitschr. f. Instrk.).

(165) Andere Normalelemente. Das Kupferzinkelement (Fleming) wird in mehreren Formen als Normalelement empfohlen; das Element kann aber nur bei geringen Ansprüchen an die Genauigkeit benutzt werden. In Fällen, wo es nur auf einen grob angenäherten Wert ankommt, ist auch der Akkumulator als Normal-

element zu verwenden; seine Entladungsspannung hängt von der Säurekonzentration und der Temperatur ab und ist durchschnittlich zu etwa 1,9 V anzusetzen. Eine größere Genauigkeit als etwa 5% kann man dabei aber nicht verbürgen.

Widerstände.

(166) Herstellung von Widerständen. Material. Zur Herstellung von Meßwiderständen eignet sich am besten Manganin (Isabellenhütte in Dillenburg, S. 50). Es hat einen verhältnismäßig großen spezifischen Widerstand und einen fast verschwindenden Temperaturkoeffizienten. Außerdem zeichnet es sich durch eine sehr kleine Thermokraft gegen Kupfer aus (1,5 μ V/°C). Andererseits oxydiert sich Manganin verhältnismäßig leicht, man muß es daher mit einer Schellackschicht überziehen. Andere Widerstandsmaterialien mit ähnlichen Eigenschaften sind z. B. Kruppin, Rheostatin, Resistin; vgl. Tab. S. 50.

Leiterformen und Kerne. Größere Widerstände (von 0,1 Ω an aufwärts) werden in der Regel aus Drähten, kleine wegen der besseren Kühlung aus Blechen hergestellt. Als Kern der Rollen dienen am besten mit dünnem Seidenband bewickelte Metallröhren oder, wenn kein Metall angewandt werden soll, Porzellanrollen. Die Drähte sollen doppelt mit Seide umsponnen sein; sogenannte Emailledrähte sind für gute Widerstände nicht brauchbar.

Manche Vorteile bietet es, die Widerstände in Form von dünnen seidenumsponnenen Drähten oder blanken dünnen Bändern (Plätte) auf Glimmerblätter aufzuwickeln. Leider lassen diese Widerstände infolge der Knickstellen an den Kanten des Glimmerblattes oft an Konstanz zu wünschen übrig.

Nach dem Wickeln werden die Widerstände schellackiert und in einem Ofen bei 140° C 10 Stunden lang „künstlich gealtert", wobei der Widerstand um 1—2% abnimmt. Bei genauen Widerständen müssen alle Verbindungen zwischen Manganinkörper und Kupferzuleitungen mit Hartlot hergestellt werden.

Art der Wicklung. In der Regel werden Drahtwiderstände bifilar gewickelt, um ihre Selbstinduktion möglichst herabzusetzen. Je dicker der Widerstandsdraht ist (kleine Widerstände), um so unvollkommener wird dies erreicht. Über eine Wicklungsart zur vollkommeneren Beseitigung der Selbstinduktion s. K. W. Wagner, ETZ 1915, S. 606, 621.

Bei größeren Widerständen (500 Ω) macht sich die Kapazität störend bemerkbar. Ihre Wirkung wird aufgehoben durch geeignete Unterteilung der Widerstandsrollen und die Wicklung von Chaperon (123).

Weitere Literatur: Orlich, Verh. d. phys. Ges. 1910, S. 949. Curtis u. Grover, Bull. Bur. of Stand. 1912, Bd. 8, Nr. 3. Wenner, Weibel und Silsbee, Bull. Bur. of Stand., 12, S. 11. Orlich u. Schultze, Arch. f. El. Bd. I, S. 1.

(167) Normalbüchsen für größere Widerstände. Die Normalbüchsen für Widerstände von 0,1 bis 10000 Ω besitzen als Zuleitungen zwei starke Kupferbügel, die in zwei Quecksilbernäpfe eingehängt werden. Der Widerstand rechnet von einem Quecksilbernapf zum andern. Während der Messung wird die Büchse in ein Petroleumbad eingehängt. Die zeitliche Konstanz der Widerstände ist sehr groß (Jaeger und Lindeck, Ztschr. Instrk. Bd. 18, S. 97, 1898 und Bd. 26, S. 15, 1906). Rosa und Babcock (Bull. Bureau of Standards Bd. 4, S. 121, 1907) haben darauf aufmerksam gemacht, daß namentlich große Widerstände sich infolge der hygroskopischen Eigenschaften des Schellacks periodisch ändern. Die Änderung ist meist kleiner als 0,01%. Über Mittel, diesen Einfluß zu beseitigen s. Lindeck, Ztschr. Instrk. Bd. 28, S. 229, 1908.

(168) Kleine Widerstände. Widerstände unter 0,1 Ω werden schon wegen der Kühlung aus Blechen hergestellt. Im Interesse der Konstanz ist es zu empfehlen, die Bleche nicht dünner als 0,5 mm zu wählen. Bei sehr kleinen Beträgen wird eine größere Zahl von Blechen parallel geschaltet. Sie werden in starke Kupferklötze,

die zu den Hauptstromklemmen führen, hart eingelötet. Außerdem zweigen von den Kupferklötzen dicht an den Enden des Manganinkörpers zwei Kupferleitungen zu den Potentialklemmen ab. Der Widerstand rechnet von der einen Verzweigungsstelle bis zur anderen, so daß er fast ausschließlich aus Manganin besteht.

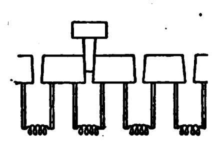
Die kleinen Widerstände werden in zwei Formen hergestellt; der kleine Typ kann bei guter Petroleumkühlung mit 100 W belastet werden, der größere mit 1000 W. Der größere enthält außer einer Rührvorrichtung eine Kühlschlange, durch welche während der Belastung dauernd Wasser fließen muß.

Die gewöhnlichen Normalwiderstände aus Blech dürfen nicht ohne weiteres mit Wechselstrom benutzt werden, weil auf Beseitigung der Selbstinduktion nicht Rücksicht genommen ist. Über praktisch induktionsfreie Normalwiderstände aus bifilar gelegten Blechen s. Orlich, Ztschr. Instrk. Bd. 29, S. 241, 1909; ferner Paterson und Rayner (Journ. Inst. Electr. Eng. Bd. 42, S. 455, 1909), welche wassergekühlte Rohre verwenden; die Induktivität ist nach Campbell (Electrician Bd. 61, S. 1000, 1908) kompensiert.

(169) Widerstandssätze, Rheostaten. Eine größere Zahl von Rollen, die in der oben angegebenen Weise hergestellt sind, wird zu einem Widerstandssatz vereinigt.

a) Stöpselkästen. Die Enden der Rollen werden an Messingklötze geführt, die durch Stöpsel kurz geschlossen werden können (s. Abb. 41). Die Stöpsel müssen gut eingeschliffen sein, die Kontaktflächen sauber gehalten werden. Stöpselkästen verschwinden aus der Praxis mehr und mehr.

b) Kurbelkästen. Konstruktion nach der Abb. 42.


Abb. 41. Stöpselkasten.

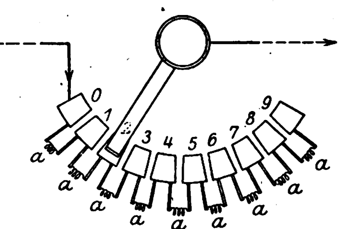


Abb. 42. Kurbelkasten.

Neuere Widerstandssätze werden fast durchweg als Kurbelkästen gebaut; jeder Kurbel entspricht eine Dekade. Am besten macht man die Drehachsen der Kurbel nicht stromleitend, sondern verwendet eine Doppelbürste, die an dem Kurbelarm befestigt ist, und einen Kontaktklotz des Widerstandes mit einer parallel zu den Klötzen verlaufenden Leiste verbindet. Die Bürsten müssen sehr gut eingeschliffen sein, damit der Übergangswiderstand vernachlässigbar klein bleibt. Die Schleifflächen sind hin und wieder mit reinem Petroleum zu reinigen.

Normalwiderstände und Widerstandssätze werden von der Phys.-Techn. Reichsanstalt geprüft und beglaubigt.

Verfahren der Widerstandsmessung.

(170) Widerstandsmessung durch Vertauschung. Man schaltet nach Abb. 43 und reguliert den Widerstand im Kasten R so, daß der Strommesser bei Umlegen des Umschalters seinen Ausschlag nicht ändert; dann ist: $R_x = R$.

(171) Widerstandsbestimmung durch Messung von Strom und Spannung. Widerstände sind häufig ziemlich stark von der Temperatur des Widerstandsdrahtes abhängig. Deshalb empfiehlt es sich in praktischen Fällen, die Messung mit der Strombelastung und bei derjenigen äußeren Temperatur vorzunehmen,

bei der man den Widerstand zu kennen wünscht. Wird keine zu große Genauigkeit verlangt, so ist es am zweckmäßigsten, den Belastungsstrom I, der auf den gewünschten Wert gebracht wird, durch einen geeigneten Strommesser zu messen und gleichzeitig den zugehörigen Spannungsabfall E an den Klemmen des Widerstandes durch einen geeigneten Spannungsmesser. Zweckmäßig werden dazu gute Präzisionsapparate gebraucht mit einer genügend großen Zahl von Meßbereichen (etwa im Verhältnis 1 : 2 fortschreitend) für Strom und Spannung. Man findet dann den gesuchten Widerstand R_x aus E/I. Vorsicht ist wegen des Eigenverbrauches der Meßapparate am Platze. Man hat zwei Schaltmöglichkeiten:

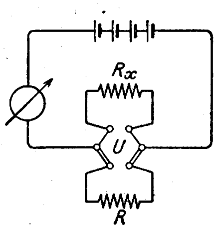


Abb. 43. Widerstandsmessung durch Vertauschung. R Widerstandskasten, R_x zu messender Widerstand.

a) Schaltung für größere Widerstände, die bei höheren Spannungen zu messen sind. Schaltung nach Abb. 44a. Ist e_i der Spannungsabfall im Strommesser bei der Belastung mit dem Strom I, so ist: $R_x = (E - e_i)/I$. e_i pflegt in diesem Fall klein gegen E zu sein.

b) Schaltung für kleinere Widerstände bei hoher Strombelastung. Schaltung nach Abb. 44b. Ist i_e der Stromverbrauch des Spannungsmessers bei der Anzeige von E Volt, so wird: $R_x = E/(I - i_e)$. In diesem Falle pflegt i_e gegen I vernachlässigbar klein zu werden.

Macht man die Spannungsmessung mit dem Kompensator oder dem Elektrometer, so fällt die eben besprochene Korrektion weg.

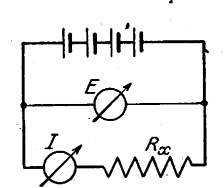


Abb. 44a.

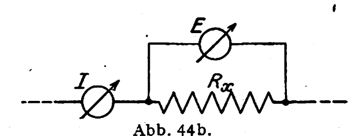


Abb. 44b.

Widerstandsmessung durch Bestimmung von Strom und Spannung. Abb. 44a für größere Widerstände. Abb. 44b für kleinere Widerstände.

(172) Ohmmesser. Zu einem direkt zeigenden Ohmmesser kommt man, indem man nach der Methode (171) die Strom- und Spannungsmessung nacheinander mit demselben Apparat ausführt. Abb. 45 zeigt die Schaltung. Ist der Schalter nach oben gelegt, so gibt der Apparat einen Ausschlag α prop. E, liegt er nach unten, so geht sein Ausschlag auf β zurück, wo $\beta : \alpha = R_e/(R_x + R_e)$ ist. (R_e innerer Widerstand des Spannungsmessers.) Also $R_x = R_e \frac{\alpha - \beta}{\beta}$. Der Apparat ist praktisch nur brauchbar, wenn R_x von derselben Größenordnung wie R_e ist.

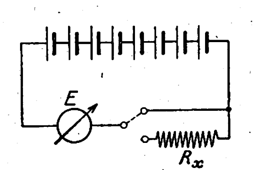


Abb. 45. Ohmmesser.

Von Bruger sind Apparate mit beweglichem System aus zwei kreuzförmig angeordneten Spulen eingeführt worden. Die eine Spule führt einen Strom proportional der Spannung an den Widerstandsklemmen, die andere einen proportional dem Belastungsstrom. Der Ausschlag wird proportional dem Quotient aus beiden, d. h. proportional dem Widerstand.

Literatur: ETZ 1894, S. 333; 1906, S. 533; 1915, S. 478. — Helios F. 1912, S. 42; 1916, S. 304.

(173) Wheatstonesche Brücke. Wird ein höherer Grad der Meßgenauigkeit verlangt, so wählt man am besten die sogenannten Brückenmethoden und zwar

für größere Widerstände (etwa größer als 1 Ω) die Wheatstonesche Brücke, für kleinere Widerstände die Thomsonbrücke. Das Arbeiten mit den Brückenmethoden, namentlich mit der Thomsonbrücke, erfordert Gewandheit und Erfahrung, Fehlerquellen werden leicht übersehen und täuschen dem Arbeitenden leicht eine eingebildete Genauigkeit vor. Vor allem ist auf eine tadelfreie Isolation aller Leitungen zu sehen. Mit fest verlegten Leitungen, die sich durch ganze Maschinenhäuser ziehen, wird man keine guten Resultate erwarten dürfen. Wichtig ist die richtige Wahl des Galvanometers für den Nullstrom.

Vier Widerstände a, b, c, d (Abb. 46) werden in einer geschlossenen Reihe hintereinander verbunden; man kann diese Verbindung als ein Viereck ansehen, dessen Diagnonalen AD und BC sind. Bringt man in die eine Diagonale eine Stromquelle, in die andere ein Galvanometer, so fließt durch das letztere kein Strom, wenn sich verhält

$$a : b = c : d.$$

Kennt man einen dieser Widerstände (c) und das Verhältnis von zwei anderen ($b : d$), so kann man den vierten (a) bestimmen.

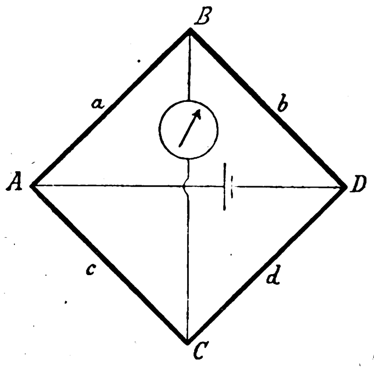


Abb. 46. Wheatstonesche Brücke.

Abb. 47. Verzweigungsbüchse.

Empfindlichkeit Es ist am vorteilhaftesten, die 4 Widerstände $abcd$ sowie den des Galvanometers und den der Batterie einander gleich zu machen. Praktisch erhält man die beste Anordnung, wenn man für die Zweige bd eine sogenannte Verzweigungsbüchse nimmt. Diese besteht aus einer Normalwiderstandsbüchse, die Abzweigungen zu drei Kontaktstücken hat, mit denen abwechselnd eine kleine Kurbel in Berührung gebracht werden kann (Abb. 47). Es ist z. B.

$$AD = DB = 100\,\Omega \quad \text{bzw.} \quad 1000\,\Omega$$
$$CD = DE = 0{,}05\,\Omega \quad \text{bzw.} \quad 0{,}5\,\Omega\,.$$

Folglich $AC : CB = 1 - 0{,}001$; $AE : EB = 1 + 0{,}001$.

Man schaltet nun in c (Abb. 47) einen Widerstand von der Größe ein, daß der Galvanometerausschlag möglichst klein wird, wenn die Kurbel auf D steht, und macht folgende Ablesungen:

Stellung des Stromwenders im Batteriekreis	I	II	II	II
Stellung der Kurbel der Verzweigungsbüchse	D	D	C	E
Galvanometerablesung	α	β	γ	δ

Dann ist der gesuchte Widerstand

$$c \cdot \left(1 - \frac{\alpha - \beta}{\gamma - \delta} \frac{1}{1000}\right).$$

Es ist praktisch, die Empfindlichkeit so zu wählen, daß $\gamma - \delta = 100$ Skalenteilen ist, dann gibt $\alpha - \beta$ die an c anzubringende Korrektion in Hunderttausendsteln.

Nach Beendigung dieser Messung vertauscht man die Zweige b und d miteinander, indem man die Büchse um 180° dreht, und wiederholt die Messung; dies geschieht, um kleine Ungleichheiten von b und d zu eliminieren. Aus den erhaltenen Resultaten nimmt man das Mittel.

Zur Messung sehr großer Widerstände benutzt man eine ungleicharmige Brücke, und zwar wird in der Regel ein dekadisches Verhältnis ($b : d = 1 : 10$ bzw. $1 : 100$) gewählt. Hierfür sind passende Kästen konstruiert worden (s. Katalog von S. & H., H. & Br., ferner Zeitschr. Instrk. 1903, S. 301).

Schleifdraht. Ist die größte Genauigkeit nicht erforderlich, so ist es zweckmäßig, mit einem Schleifdraht zu arbeiten. Die Zweige $b\ d$ werden aus einem Draht mit gleichmäßigem Querschnitt gebildet, auf dem im Punkte D ein Schleifkontakt gleitet. Dann verhält sich $a : c$ wie die Längenabschnitte $BD : CD$. Für c pflegt man einen Dekadenkasten (1. 10. 100. 1000) einzusetzen, außerdem wird am Schleifdraht eine Teilung angebracht, an welcher man direkt das Verhältnis der Längen $BD : CD$ abliest. Die Ablesung mit einer Potenz von 10 multipliziert ergibt direkt den gesuchten Widerstand (Universalgalvanometer von S. & H.).

Um durch Benutzung eines längeren Drahtes die Genauigkeit zu steigern, hat F. Kohlrausch den Meßdraht spiralig in zehn Windungen auf eine Walze gewickelt; die Walze ist drehbar, während der Kontakt von einem feststehenden Laufrädchen gemacht wird (Walzenbrücke, Hartmann & Braun). Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit ist dadurch erreichbar, daß man beiderseitig Widerstände in Spulenform zuschalten kann, die passende Vielfachen des Schleifdrahtwiderstandes sind. Zweckmäßig ist es z. B. beiderseitig das 4,5fache des Schleifdrahtes zuzuschalten. Tafeln für den Quotienten $n/(1000-n)$ bei Obach, München 1879 und H. & Br.

Prüfung und Kalibrierung eines ausgespannten Drahtes. An einem Holzklotz befestigt man zwei isolierte Metallschneiden in unveränderlichem Abstand voneinander; jede Schneide wird mit einer Klemme eines empfindlichen Galvanometers von großem Widerstande verbunden. Das Schneidenpaar setzt man auf den Rheostatendraht auf, während der letztere von einem konstanten Strome durchflossen wird; das Galvanometer zeigt einen Ausschlag, der nicht zu klein sein darf, wenn man eine sichere Prüfung zu haben wünscht. Verschiebt man die Schneiden längs des Drahtes, so sollte sich der Ausschlag nicht ändern, wenn der Draht überall gleich wäre; letzteres ist indes gewöhnlich nicht der Fall; mißt man den Ausschlag des Galvanometers für verschiedene Stellen des Drahtes, so verhalten sich die abgegrenzten Widerstände wie die Ausschläge. Über andere Kalibrierungsmethoden und die Kalibrierung von Widerstandskästen siehe F. Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik, 11. Aufl., S. 455 ff.

(174) Messung kleiner Widerstände. Kleine Widerstände müssen besonders behandelt werden, weil bei diesen der Einfluß der Zuleitungen berücksichtigt bzw. eliminiert werden muß. Deshalb besitzen Meßwiderstände unter 0,1 Ω zwei Hauptstrom- und zwei Potentialklemmen (168).

a) Vergleich mit dem Kompensator. Der unbekannte Widerstand x und der bekannte a sind mit ihren Hauptstromklemmen in Reihe geschaltet. Mittels des Umschalters U (Abb 48) wird zuerst der Spannungsabfall an den Potentialklemmen von x und dann derjenige von a gemessen. Dann verhält sich $x : a$ wie die am Kompensator eingestellten Widerstände. Es empfiehlt sich, die Einstellungen möglichst rasch hintereinander abwechselnd zu wiederholen, um geringe Änderungen des Stromes eliminieren zu können.

b) Thomsonsche Doppelbrücke. Wie bei der vorigen Methode werden x und a zu einem mit starken Strömen belastbaren Kreis vereinigt (Abb. 49). Von den Potentialklemmen wird dann zu vier größeren Widerständen $r_1\ r_2\ R_1\ R_2$ abgezweigt. Die Widerstände r_1 und R_1 werden gleich groß gewählt und ebenso $r_2 = R_2$. Man pflegt $r_2 = R_2 = 10$, 100 oder 1000 Ω zu machen und $r_1 = R_1$ so

zu regulieren, daß das Galvanometer den Strom Null anzeigt. Für r_1 und R_1 nimmt man am zweckmäßigsten zwei in einem Kasten untergebrachte Kurbelwiderstandssätze, deren Kurbeln zwangläufig miteinander verbunden sind, so daß ihre Gleichheit dadurch automatisch gewährleistet ist. Gleichgewichtsbedingung ist: $x : a = R_1 : R_2$.

Doppelbrücke von Siemens & Halske, O. Wolff, Jaeger, Lindeck, Diesselhorst, Zeitschr. Instrk. Bd. 23, S. 33 und 65, 1903.

Die Thomsonbrücke eignet sich gut zur Bestimmung der Leitfähigkeit gut leitender Drahtsorten (Kupferschienen). Ein grader Draht von 1—1,50 m Länge wird in einen Petroleumkasten gebracht und mit Klemmbacken zur Stromzuführung versehen. Zwei voneinander isolierte Schneiden, deren Abstand genau gemessen werden kann, werden auf den Draht aufgesetzt; sie bilden die Potentialklemmen. Das Petroleum muß während des Versuches gerührt werden. Der Querschnitt des Leiters wird entweder mit einer Lehre oder durch Wägung eines Stückes in Luft und Wasser gemessen. Daraus findet man dann den spezifischen Widerstand. Ist der Petroleumkasten mit einer Heizvorrichtung versehen, so kann man auch den Temperaturkoeffizienten bestimmen. Siehe auch Kupfernormalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

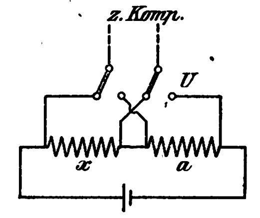


Abb. 48. Widerstandsvergleich mittels Kompensator.

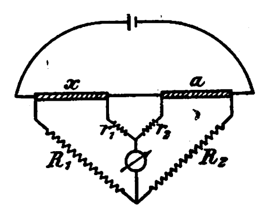


Abb. 49. Thomsonsche Doppelbrücke.

(175) Widerstand von zersetzbaren Leitern. Infolge der auftretenden Polarisation sind die für Metallwiderstände angegebenen Methoden hier nicht ohne weiteres zu gebrauchen.

Mit Gleichstrom kann man den Widerstand eines Elektrolyts in folgender Weise nach der Vertauschungsmethode (170) ermitteln: Man schaltet zunächst zwischen den Elektroden nur ein kurzes Stück des zersetzbaren Leiters und beobachtet den Ausschlag des Galvanometers. Darauf vergrößert man den Abstand der Elektroden und schaltet so viel Rheostatenwiderstand aus, daß der Ausschlag ebenso groß wird wie vorher. Der ausgeschaltete Rheostatenwiderstand ist gleich der Vermehrung des Widerstandes des Elektrolyts, welche durch die Verschiebung der Elektroden erzielt wurde.

Wechselstrom. (F. Kohlrausch, M. Wien, Apparatur bei H. & Br.) Die Verwendung von Wechselstrom vermeidet das Entstehen einer Polarisation, sofern man die Elektroden (Platin) mit Platinmoor überzieht. Man verwendet die Wheatstonesche Brücke, indem man das Galvanometer durch ein Telephon ersetzt. Es wird darauf eingestellt, daß das Telephon verstummt.

Über Stromgeber für Widerstandsmessungen mit Wechselstrom siehe (188).

Da es meistens auf den spezifischen Leitungswiderstand abgesehen ist, so gebraucht man zu den Bestimmungen ein Gefäß, welches die Berechnung des Widerstandes aus den Abmessungen erlaubt, am besten eine Glasröhre, welche einen möglichst konstanten Querschnitt besitzt. In dieser lassen sich die Elektroden (Platin, platiniertes Silber) bequem verschieben. Tritt bei Gleichstrom Gasentwicklung ein, so verwendet man ein U-förmiges Glasrohr und als Elektroden Drahtnetze oder Spiralen.

Vergleichslösungen. Will oder kann man das Gefäß, in welchem die Bestimmung vorgenommen werden soll, nicht geometrisch ausmessen, so bestimmt man in demselben Gefäß den Widerstand eines Leiters von bekanntem spezifischen Widerstand und vergleicht den der zu untersuchenden Flüssigkeit damit. Als Vergleichsflüssigkeiten benutzt man[1]) die in der nachstehenden Tabelle angegebenen Lösungen.

Hat man in demselben Gefäß einmal den Widerstand R einer der Vergleichsflüssigkeiten und dann den Widerstand r der zu untersuchenden Flüssigkeit bestimmt, so ist der gesuchte spezifische Widerstand der letzteren $= \varrho\, R/r$.

Widerstand von Erdleitungen s. (255) u. folg., von Akkumulatoren s. (269) u. folg.

Vergleichsflüssigkeit	Spez. Gew.	Widerstandskoeffizient, bezogen auf Ohm: $R = \varrho \cdot \frac{l}{q}$ l in cm, q in cm²
Wässerige Schwefelsäure, bestleitend, 30,0% reine Säure	1,223	$\varrho = 1{,}35\,[1 - 0{,}016\,(t - 18)]$
Gesättigte Kochsalzlösung, 26,4% ClNa	1,201	$\varrho = 4{,}63\,[1 - 0{,}022\,(t - 18)]$
Magnesiumsulfatlösung (normal) 17,4% $MgSO_4$ (wasserfrei)	1,190	$\varrho = 20{,}3\,[1 - 0{,}026\,(t - 18)]$
Chlorkaliumlösung (normal) 7,46% KCl	1,045	$\varrho = 10{,}2\,[1 - 0{,}020\,(t - 18)]$

(176) Widerstandsmessung an Isolierstoffen. Zur Messung des Widerstandes von festen Isolierstoffen eignen sich am besten Platten von etwa 15×15 cm² Größe. Eine derartige Platte P (Abb. 50) wird zwischen zwei ebene Metallelektroden gelegt, die am besten mit Staniol gepolstert und mit Gewichten gegeneinander gepreßt werden, damit sie sich der oft nicht ebenen Fläche gut anschmiegen (Hg-Elektroden s. Heinke, Handb. d. El., Bd. 2, 1, S. 310). An die Elektroden aa werden die Pole einer Akkumulatorenbatterie B gelegt. Aus der Spannung E der letzteren und dem mittels eines Galvanometers G gemessenen Strome I wird der Isolationswiderstand als E/I berechnet. Um Ströme vom Galvanometer auszuschließen, welche andere Wege als die zu untersuchende Isolationsschicht passiert haben, erdet man einen Pol der Batterie, legt das Galvanometer in die mit dem geerdeten Pol verbundene Leitung und versieht sämtliche Leitungen vom Isolationsmaterial bis zum geerdeten Pol (einschl. Galvanometer) mit einer metallischen Schutzhülle, die geerdet ist. Der im Galvanometer gemessene Strom setzt sich zusammen aus dem Strom, der durch das Material hindurchgedrungen ist, vermehrt um den Strom, der über die Oberfläche geflossen ist. Will man letzteren ausschließen, so legt man um die am geerdeten Pol liegende Elektrode einen Schutzring bb, der ebenfalls geerdet ist und dadurch die Oberflächenströme am Galvanometer vorbeiführt. Arbeitet man bei besser isolierenden Materialien mit höheren Spannungen, so empfiehlt es sich, in die Leitung zur Sicherheit einen

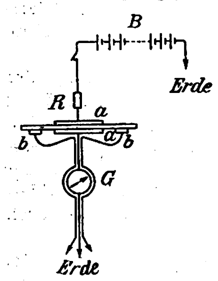


Abb. 50. Isolationswiderstand von Platten.

[1]) Vgl. F. Kohlrausch, Lehrb. d. pr. Phys. und F. Kohlrausch und L. Holborn, Leitvermögen der Elektrolyte. 1898.

Jodkadmium- oder Wasserwiderstand R von einigen Megohm zu legen (228). In vielen Fällen kann sein Vorhandensein bei der Rechnung vernachlässigt werden. Ist die Isolation so gut, daß die Empfindlichkeit des Galvanometers nicht mehr ausreicht, so kann man in der Weise verfahren, daß man zunächst die Spannung E an die Elektroden legt, danach eine gemessene Zeit t die eine Elektrode vom Batteriepol trennt und dann von neuem die Spannung E anlegt. Hierbei fließt eine Elektrizitätsmenge Q auf die Elektrode, die gleich dem Ladeverlust in der Zeit t ist und durch ein ballistisches Galvanometer gemessen werden kann (184). Dann ist annähernd der Isolationswiderstand gleich Et/Q.

Isolationswiderstände gehorchen nicht dem Ohmschen Gesetz: entgegen diesem Gesetz ist der Wert E/I von der Größe der Spannung und der Dauer ihrer Einwirkung abhängig (77, 78).

Im Augenblick des Einschaltens erfolgt ein kräftiger Stromstoß, der von der Ladung des eine Kapazität bildenden Isolationsmaterials herrührt, und der am besten am Galvanometer durch Kurzschließen vorübergeführt wird. Danach pflegt der Galvanometerausschlag langsam abzunehmen (d. h. der Isolationswiderstand wird scheinbar größer), weil ein Teil der Elektrizität in die Oberfläche des Materials eindringt, ohne es ganz zu durchfließen. Dazu kommt, daß bei feuchten Materialien die Feuchtigkeit infolge der Stromwärme zu verdampfen beginnt und dadurch den Widerstand verändert.

Der Isolationswiderstand ist in der Regel nicht proportional der Dicke des Materials. Es ist deshalb ratsam, die Messungen an Platten von verschiedener Dicke vorzunehmen. Im übrigen empfiehlt es sich, die Platten zunächst in vollständig ausgetrocknetem Zustand und danach nach mehrtägigem Liegen in Wasser zu untersuchen. Außer der Feuchtigkeit kann auch die Temperatur einen erheblichen Einfluß haben (78).

Im allgemeinen erhält man bei allen Isolationsmessungen ziemlich stark schwankende Resultate; die hierbei erhaltenen Zahlen haben daher nur den Wert der Größenordnung.

Isolierfähigkeit von Lacken wird untersucht, indem man sie auf dünne Metallbleche, auf Papier, Leinen oder Segeltuch aufbringt und den Widerstand wie bei festen Platten mißt. Da die Zufälligkeiten hierbei in Hinsicht der Dicke der Schicht und Güte des Lackierens sehr groß sind, so sind die Resultate in der Regel noch unsicherer als bei festen Materialien.

Isolierrohre werden zum Zweck der Prüfung mit einem Metallmantel versehen oder mit Stanniol bekleidet (äußere Elektrode). Sollen die Röhren trocken geprüft werden, so füllt man sie mit Metallpulver (innere Elektrode), sollen sie aber naß geprüft werden, so werden sie mit leicht angesäuertem Wasser gefüllt. In diesem Falle wird die Messung zweckmäßig über einen längeren Zeitraum regelmäßig wiederholt, bis die Isolationsschicht zerstört ist.

Zuweilen kann man auch als innere Elektrode Quecksilber anwenden; doch ist es ratsam, dabei die Röhren horizontal zu legen, weil sonst das Quecksilber infolge des hohen Druckes zu leicht die Isolierschicht durchdringt.

Ebenso wichtig ist die Messung der Oberflächenleitung; dazu preßt man zwei parallele zylindrische Stanniolpolster in gemessenem Abstand an die Oberfläche an und mißt wie vorher. Man untersucht den Einfluß der Einwirkung der Luft, von Säuren, Alkalien, Wasser, Ölen u. a. auf die Oberflächenleitung.

Porzellanisatoren werden trocken und benetzt (im künstlichen Regen) geprüft. Man mißt den Übergangswiderstand vom Drahtlager, in dem ein Leitungsdraht ordnungsmäßig befestigt ist, zur Stütze, ebenso bei Isolatoren für Hochspannung die Überschlagspannung; die Stütze des Isolators ist zu erden.

Literatur: Wernicke, Die Isoliermittel der Elektrotechnik, Braunschweig 1908. — Håkansson, Die plastischen Isolationsmaterialien, ETZ 1910, S. 953, 997. — Passavant, ETZ 1912, S. 450. — Schweizer Arch. f. El. 2, S. 332 — Gewecke und Krukowski, Arch. El. 6, S. 407.

Strom- und Spannungsmessung.

(177) Strommessung mit direkt zeigenden Apparaten. In den meisten Fällen der Praxis verwendet man zur Strommessung Zeigerapparate (139 ff.) (für sehr schwache Ströme Spiegelgalvanometer). Die Stromkonstante K (Strom/Ausschlag) wird durch die Kompensationsmethode (180 u. f.) oder direkt zeigende Präzisionsstrommesser (141) bestimmt oder kontrolliert. Um die Empfindlichkeit herabzusetzen, verwendet man Nebenschlüsse: wird zum Strommesser vom Widerstand R_g ein Nebenschluß vom Widerstand R_N gelegt, so wird die Konstante $K\,(1 + R_g/R_N)$. Beträgt also der Abzweigwiderstand $^1/_9\ ^1/_{99} \ldots ^1/_z$ vom Widerstand des Strommessers, so geht $^1/_{10}\ ^1/_{100} \ldots ^1/_{z+1}$ des gesamten unverzweigten Stromes durch den Strommesser und die Konstante des Strommessers mit Verzweigung wird 10, 100, ..$z+1$ mal so groß.

Will man den Strommesser durch einen Nebenschlußwiderstand von $R_N\ \Omega$ $k$mal so unempfindlich machen, d. h. soll die Konstante des Strommessers mit Nebenschluß kK werden, so muß $R_N = R/(k-1)$ gemacht werden, wo R den Widerstand des Strommessers selber einschl. eines Vorschaltwiderstandes bedeutet.

Beispiel: Ein Milliamperemeter $c = 0{,}001$ von $R_N = 3\ \Omega$ soll zu Strommessungen bis 300 A brauchbar gemacht werden, d. h. $kK = 2$; $k = 2000$, folglich ist der Nebenschlußwiderstand $3/1999\ \Omega$ zu wählen.

Der Widerstand R besteht zum großen Teil aus Kupfer; daher ist ein Strommesser mit Nebenschluß von der Temperatur abhängig. Man kann aber geeignete Kompensationen anwenden (vgl. z. B. Kollert, ETZ 1910, S. 1219).

Schließt man die Klemmen eines Strommessers durch einen Widerstand R, welcher die Unterabteilungen $r_1 r_2 r_3$.. besitzt, so werden die Konstanten des Strommessers, wenn man den Hauptstrom an den Enden dieser Unterabteilungen zuführt:

$$\frac{KR}{r_1}\ \frac{KR}{r_2}\ \frac{KR}{r_3} \ldots$$

Die Empfindlichkeiten verhalten sich also unabhängig davon, was man für einen Strommesser benutzt, wie

$$\frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3} \quad \text{(Ayrtonscher Nebenschluß)}.$$

Dieser Satz ist wichtig für Spiegelgalvanometer: Ein Rheostat von 100000 Ω mit Unterabteilungen von

30 000, 10 000, 3000, 1000, 300, 100, 30, 10, 3, 1 Ω

paßt zu jedem Galvanometer und erlaubt, dessen Empfindlichkeit von dem Betrage, den letztere bei Nebenschaltung von 100 000 Ω besitzt, herabzusetzen auf

$^1/_3$, $^1/_{10}$, $^1/_{30}$, $^1/_{100}$, $^1/_{300}$, $^1/_{1000}$, $^1/_{3000}$, $^1/_{10000}$, $^1/_{30000}$, $^1/_{100000}$.

(178) Spannungsmessung durch direkt zeigende Apparate. Auch Spannungen werden in der Praxis meist durch direkt zeigende Apparate gemessen und zwar:

a) durch nicht Strom verbrauchende: Elektrometer (151—155). Mit diesen kann man am einfachsten in Doppelschaltung (152,3) die Potentialdifferenz zwischen zwei beliebigen Punkten durch einfaches Anlegen messen.

b) durch Strom verbrauchende. Jeden Strommesser kann man durch einen geeigneten Vorschaltwiderstand zum Spannungsmesser machen. Ist K die Konstante des Strommessers und R der Gesamtwiderstand (einschl. des Vorschaltwiderstandes), so ist RK die Konstante des Spannungsmessers; d. h. die Ablesung mit RK multipliziert ergibt die zu messende Spannung. Beispiel: $^1/_{3000}$ A gebe einen Skalenteil Ausschlag des Strommessers, d. h. $K = {}^1/_{3000}$. Schaltet man so viel Widerstand vor, daß der Gesamtwiderstand des Apparates 1200 Ω wird, so ist $RK = 0{,}4$. Zeigt also der Apparat 150 SkT Ausschlag, so liegen $150 \cdot 0{,}4 = 60$ V an seinen Klemmen.



Sollen die Angaben des Spannungsmessers von der Temperatur unabhängig sein, so muß der Vorschaltwiderstand aus Manganin groß sein gegen den Widerstand der Kupferspule.

Der stromführende Spannungsmesser kann dadurch, daß er an zwei Punkten angelegt wird, die Stromverteilung in den Zweigen zwischen diesen Punkten und dadurch auch die Spannung zwischen den Punkten, an die er gelegt wird, verändern. Es herrscht also, streng genommen, nur so lange, wie er angelegt ist, zwischen diesen Punkten die von ihm angegebene Spannung. Nur wenn der Widerstand zwischen den Punkten klein ist gegen den Widerstand des Spannungsmessers, ist diese Veränderung vernachlässigbar klein.

(179) Potentialmessung. Um die Potentiale verschiedener Punkte eines Stromkreises gegen einen bestimmten Punkt des letzteren, z. B. gegen Erde zu messen, benutzt man einen Kondensator (Kapazität C), ein Normalelement (EMK E) und ein Galvanometer, welche nach Abb. 51 geschaltet werden. Zuerst eicht man das Galvanometer; der Umschalter u steht nach links. Berührt die Taste den oberen Kontakt, so nimmt der Kondensator eine Ladung an, die der EMK E proportional ist und beim Niederdrücken der Taste am Galvanometer den ballistischen Ausschlag a hervorbringt, der gleichfalls der EMK E proportional ist. Um nun das Potential V am Punkte P eines Stromkreises, der z. B. die Erde benutzt, zu bestimmen, legt man den Umschalter u nach rechts und verbindet den oberen Kontakt der Taste mit dem zu untersuchenden Punkt P der Leitung. Erhält man jetzt bei Druck der Taste den Ausschlag α_1, so ist $V : P = \alpha_1 : \alpha$.

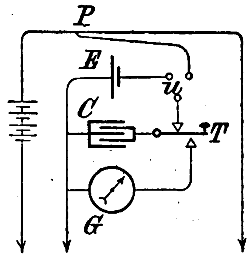



Abb. 51. Potentialmessung.

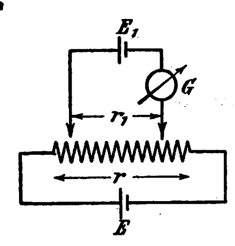


Abb. 52. Schema des Kompensators.

(180) Kompensationsmethode. Die gesetzliche Einheit der Stromstärke ist zwar durch das Silbervoltameter gegeben; in der Praxis werden aber voltametrische Versuche überhaupt nicht mehr angestellt. Alle genauen Spannungs- und Strommessungen (Eichungen) werden vielmehr mit Kompensationsapparaten ausgeführt. Hierbei dient außer den im Kompensationsapparat befindlichen Widerständen ein Normalelement als Normal. Es wird jetzt fast ausschließlich das Westonelement (164) verwendet.

Das grundlegende Schema für den Kompensationsapparat ist in Abb. 52 dargestellt. Eine Spannung E ist durch den Widerstand r geschlossen; von einem Teil r_1 des letzteren ist eine Abzweigung gemacht, die die EMK E_1 und ein Galvanometer G enthält. Es wird auf Stromlosigkeit des Galvanometers eingestellt; dann ist: $E/E_1 = r/r_1$. Es muß also $E_1 < E$ sein. Man kann diese Methode auf zweierlei Art anwenden.

a) Messung höherer Spannungen. E ist die unbekannte EMK, E_1 ein Kadmiumelement; man macht $r_1 = E_1 \cdot 10^\alpha$ (z. B. 1018,3 Ω) und reguliert r so lange, bis G keinen Ausschlag zeigt. Dann ist $E = r/10^\alpha$ (im Beispiel $r/1000$). Bei dieser Anwendung muß also E größer sein als die Spannung des Normalelements.

Der zu messenden Spannung E wird hierbei ein wenn auch nur kleiner Strom entnommen. α wählt man in der Regel gleich 2, 3 oder 4.

b) Messung kleinerer Spannungen. E ist eine Hilfs-EMK, die während des Versuchs konstant bleiben muß. Man bringt zunächst an die Stelle E_1 ein Normalelement und macht wieder $r_1 = E_1 \cdot 10^\alpha$; es wird in r reguliert bis G den Ausschlag Null zeigt. Dann wird E_1 durch die unbekannte EMK x

ersetzt und nun, ohne den Gesamtwiderstand r zu ändern, der Widerstand r_1, von dem abgezweigt wird, so lange verändert, bis das Galvanometer wieder einsteht; sei r_x die Größe des so eingestellten Widerstandes, dann ist: $E_x : E_1 = r_x : r_1$ oder $E_x = r_x : 10^\alpha$. In diesem Falle wählt man in der Regel $\alpha = 2$ oder 3 oder 4. Benutzt man wiederum ein Kadmiumelement, so eignet sich diese Methode am besten für Spannungsmessungen von 0,001—1 V.

Das zuletzt beschriebene Verfahren ist auch am besten geeignet für genaue Strommessungen. Man hat dazu nur E_x zu ersetzen durch den Spannungsabfall in einem Normalwiderstand R_N (Abb. 53), der von dem zu messenden Strom I durchflossen wird. Es wird $I = r_x : (R_N \cdot 10^\alpha)$.

N pflegt einer ganzzahligen Potenz von 10 gleich zu sein ($= 1/10^\beta$), so daß $I = r_x \cdot 10^{\beta - \alpha}$ ist; man liest also an r_x, abgesehen vom Komma, direkt die Stromstärke ab.

Man kann aber die Methode b) auch benutzen, um h o h e S p a n n u n g e n zu messen, sofern man einen Spannungsteiler benutzt. Letzterer besteht aus einem großen Widerstand, der an die zu messende Spannung angeschlossen wird. Er enthält Abzweige, zwischen denen Spannungen bestehen, die ganzzahlige Teile der Gesamtspannung betragen. Der Wert der Teilung ist an den Klemmen vermerkt. Die Teilspannung wird nach dem Verfahren b) gemessen. Ist der Wert der Teilung $1/a$, wo also a eine ganze Zahl, meist sogar eine Potenz von 10 ist, so wird $E = a r_x : 10^\alpha$. Die Teilung wählt man natürlich so, daß E/a etwa 0,1—1 V beträgt.

Als Galvanometer wählt man am besten ein Drehspulen-Spiegelgalvanometer mit kleinem Widerstand und kurzer Schwingungsdauer. Man erreicht damit ohne Schwierigkeit eine Meßgenauigkeit von 0,01 %.

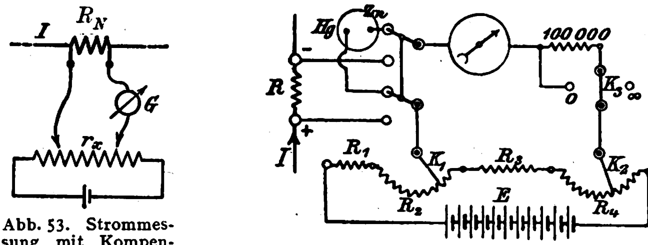


Abb. 53. Strommessung mit Kompensator.

Abb. 54. Kompensationsapparat.

(181) Kompensationsapparate. Die im vorhergehenden beschriebenen Messungen lassen sich natürlich mit gewöhnlichen Widerstandskästen ausführen, erfordern dann aber große Aufmerksamkeit. Bequemer sind die Kompensationsapparate, in denen alle zum Gebrauch notwendigen Schaltungen zusammengestellt sind. Das wichtigste ist dabei die Anordnung, vermöge deren man in der Schaltung b (s. oben) die Abzweigpunkte auf dem Widerstand r verschiebt, ohne seinen Gesamtwiderstand zu ändern. Dies geschieht in einfacher und doch vollkommener Weise folgendermaßen.

Zwei Kurbeln $K_1 K_2$ (Abb. 54) schleifen auf den Kontakten von Dekadensätzen R_2 und R_4. Diese beiden Hebel befinden sich an den Enden des Kompensationswiderstandes R_0 und entsprechen den beiden Kontakten der Abb. 52. Bei Verschiebung dieser Hebel bleibt offenbar der Widerstand im Hauptstromkreis ungeändert, während die Größe des Kompensationswiderstandes der jeweiligen Stellung dieser Hebel entspricht. Auf diese Weise erhält man also ohne weiteres zwei Stellen des Ergebnisses. Um die weiteren Stellen zu erhalten, werden zwei verschiedene Prinzipien benutzt.

Bei dem von F e u ß n e r angegebenen, von O. W o l f f weitergebildeten Apparat (Zeitschr. Instrk. 1901, S. 227; 1903, S. 301) werden zwischen die beiden

Endhebel noch Doppelkurbeln eingefügt, welche automatisch den in den Kompensationskreis eingeschalteten Widerstand aus dem Hauptstrom ausschalten und umgekehrt. Die Kurbeln bestehen aus zwei voneinander isolierten Hälften, die auf den Kontakten zweier voneinander unabhängiger Dekadensätze schleifen. Solcher Kurbeln lassen sich beliebig viele zwischen den beiden Endkurbeln anbringen. Ein anderes Prinzip, nämlich das der Abzweigung, benutzt Raps bei den Apparaten der Firma Siemens & Halske; es werden hier zwei weitere Dekaden dadurch gewonnen, daß an die Enddekaden (von je 1000 und je 10 Ω) Nebenschlüsse gelegt werden, durch welche die Unterabteilungen (Dekaden von 100 Ω und von 1 Ω) entstehen (vgl. Zeitschr. Instrk. Bd. 15, S. 215, 1895). Die Apparate anderer Firmen sind im Hauptprinzip den hier beschriebenen ähnlich.

Vgl. Hartmann & Braun, Phys. Zeitschr. Bd. 1, S. 167, 1900. R. Franke, ETZ 24, S. 978, 1903, Lindeck und Rothe, Zeitschr. Instrk. 19, S. 249, 1899 und 20, S. 293, 1900, Feußner, ETZ Bd. 32, S. 187 und 215, 1911.

Zur Messung sehr kleiner Spannungen, wie sie z. B. in Thermoelementen auftreten, braucht man Kompensatoren, welche einen kleinen Gesamtwiderstand haben, und bei denen keine Fehler durch Thermokräfte an den Kontaktstellen entstehen können. Über dahingehende Konstruktionen siehe Hausrath, Ann. d. Phys. (4) Bd. 17, S. 735, 1905, White, Zeitschr. Instrk. Bd. 27, S. 211, 1907, 34, S. 71, 107, 142, 1914, Diesselhorst, Zeitschr. Instrk. Bd. 26, S. 173, 1906; Bd. 28, S. 1, 1908.

(182) Technische Kompensationseinrichtungen. Das Prinzip einer solchen Einrichtung sei durch ein Beispiel erläutert. Ein Widerstand R besitzt zwei End- und zwei Abzweigklemmen (Abb. 55). Die Widerstände zwischen diesen verhalten sich wie 3000 : 1019. An den Abzweigklemmen liegt ein Kreis, bestehend aus kleinem Zeigergalvanometer G und Westonelement N. Durch einen vor R geschalteten Regulierwiderstand r wird die Stromstärke in R so eingestellt, daß das Zeigergalvanometer den Ausschlag Null zeigt; dann ist offenbar die Spannung an den Endklemmen von R genau 3 V. An diesen liegt aber ein Präzisionsvoltmeter V für maximal 3 V. Stellt sich dessen Zeiger nicht genau auf den Endteilstrich ein, so wird durch eine Reguliervorrichtung das magnetische Feld, in dem die Drehspule sich befindet, so lange geändert, bis der Zeiger auf diesem Teilstrich einsteht. Der Spannungsmesser zeigt dann richtig. Apparate der Weston Co., von Siemens & Halske und Nadir, siehe ferner Paulus, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1907, S. 749 und Brion, Helios 1909, S. 289.

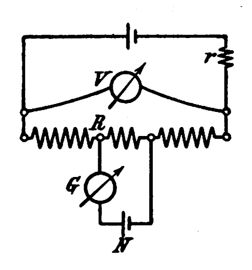


Abb. 55. Technische Kompensationseinrichtung.

Über Kompensationsmethoden für Wechselstrom s. (209).

(183) Messung hoher Spannungen durch Funkenschlagweite. Sehr hohe Spannungen können durch die Funkenschlagweite zwischen zwei Elektroden gemessen werden. Letztere ist von dem Durchmesser der Kugeln, zwischen denen die Entladung erfolgt, abhängig. Bei Anwendung einer nadelförmigen Elektrode setzt die Entladung zwar verhältnismäßig früh ein; da aber die Nadelspitzen eine undefinierte Krümmung besitzen, so hat die Eichung einer Nadelfunkenstrecke keine lange Dauer. Zu empfehlen ist bei Messungen, die einigermaßen auf Genauigkeit Anspruch machen, den sog. „Entladeverzug" durch Bestrahlung mit violettem oder ultraviolettem Licht (Bogenlampen) aufzuheben.

Über Zusammenhang zwischen Kugeldurchmesser, Schlagweite und Spannung s. (50).

Literatur: Starke, Ztschr. f. Instrk. 1903, S. 54. — M. Toepler, ETZ 1907, S. 998, 1025 und Ann. d. Phys. 29, S. 153; 1909. — Weicker, ETZ 1911, S. 436, 460. Ferner: Peck, Proc. Am. Inst. 33, S. 889/914; 1916. — Estorff, ETZ 1916, S. 61, 76. — Clarkson, El. World 59, S. 1307; 1912.

Elektrizitätsmenge.

(184) Messung eines Stromstoßes, d. i. eines Stromes von sehr kurzer Dauer. (129). Wird ein Kondensator durch ein sehr empfindliches Galvanometer entladen, oder schickt man einen rasch verlaufenden Induktionsstrom durch das letztere, so erhält das bewegliche System einen Stoß. Die Beobachtung des ersten Umkehrpunktes ergibt den sogenannten ballistischen Ausschlag α. Dann ist die durch das Galvanometer geflossene Elektrizitätsmenge Q dem ballistischen Ausschlag proportional:

$$Q = C_{ball} \cdot \alpha .$$

C_{ball} heißt die ballistische Konstante. Diese Gleichung ist nur dann richtig, wenn der Stromstoß praktisch schon vollständig abgelaufen ist, bevor das bewegliche System seine Bewegung infolge des Stoßes beginnt.

C_{ball} ist merklich von der Dämpfung des beweglichen Systems abhängig; hat man sich also das ballistische Galvanometer geeicht, so darf man während seines Gebrauches die Dämpfung nicht ändern. Darauf ist besonders zu achten bei Drehspulengalvanometern; da hier die Dämpfung von dem Widerstand des Schließungskreises abhängt, der an die Galvanometerklemmen geschlossen ist, so darf dieser Widerstand nicht verändert werden, bzw. für jeden Widerstand des Schließungskreises ist eine besondere Eichung erforderlich. Am besten arbeitet man, wenn man den Schließungswiderstand so groß wählt, daß gerade der aperiodische Grenzzustand eintritt.

Über einen Nebenschlußwiderstand, der die ballistische Empfindlichkeit im gegebenen Verhältnis herabgesetzt, ohne die Dämpfung zu ändern s. Volkmann, Ann. d. Phys. 10 S. 217 1903. (Zu beziehen durch S. & H.)

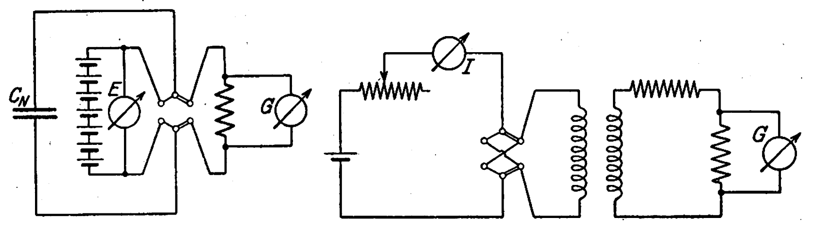


Abb. 56a und b. Eichung des ballistischen Galvanometers.
Abb. 56a durch eine Kapazitätsnormale. Abb. 56b. durch eine Induktivitätsnormale.

Eichung des ballistischen Galvanometers.

Man kann die ballistische Konstante aus der statischen berechnen; dies Verfahren ist aber wegen seiner Umständlichkeit wenig zu empfehlen; vgl. darüber z. B. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik. Besser ist die Eichung durch Normale der Kapazität oder der Induktivität.

a) Eichung durch eine Kapazitätsnormale. (Abb. 56a) Sie wird angewandt, wenn das ballistische Galvanometer zur Messung von Kapazitäten benutzt werden soll.

Eine Batterie, deren Spannung durch einen Spannungsmesser E gemessen wird, lädt, wenn der Umschalter nach links gelegt ist, den Normalkondensator C_N, dessen Kapazität (in μF) genau bekannt sei. Wird der Umschalter nach rechts herumgelegt, so entlädt sich der Kondensator durch das ballistische Galvanometer G, zu dem nötigenfalls ein Nebenschluß gelegt ist, und gibt den ballistischen Ausschlag α; dann ist

$$C_{ball} = C_N E / \alpha .$$

Für verschiedene Nebenschlüsse ist wegen der veränderten Dämpfung jedesmal eine besondere Eichung vorzunehmen.

b) Eichung durch eine Induktivitätsnormale. (Schaltung nach Abb. 56 b). Man reguliert eine passende primäre Stromstärke ein und mißt sie mit dem Strommesser I. Wird nun durch den Umschalter die primäre Stromstärke in der Induktivitätsnormale mit der bekannten Gegeninduktivität M gewendet, so entsteht in dem sekundären Stromkreis ein Stromstoß, der im ballistischen Galvanometer den ballistischen Ausschlag α hervorruft. Dann ist

$$R_2 \cdot C_{ball} = \frac{2MI}{\alpha}.$$

Darin ist R_2 der gesamte Widerstand des sekundären Kreises. C_{ball} ist von der Größe dieses Widerstandes abhängig. Da das Galvanometer beim Gebrauch nur mit genau demselben Schließungswiderstande R_2 gebraucht werden darf, mit dem es geeicht wurde, so geht auch in die Formeln beim Gebrauch nur das Produkt $R_2 \cdot C_{ball}$ ein. Man braucht also nur dafür zu sorgen, daß der Gesamtwiderstand des sekundären Kreises konstant bleibt; seinen absoluten Wert dagegen braucht man gar nicht zu kennen.

(185) Die Elektrizitätsmenge, welche während einer längeren Zeit durch einen Leiter strömt, wird mit dem Voltameter gemessen. Aus der niedergeschlagenen bzw. aufgelösten Menge kann man mit Hilfe des elektrochemischen Äquivalentes ohne weiteres die Elektrizitätsmenge in Coulomb berechnen (67, 157 und folg.).

Mittelbar kann man die durchgeströmte Menge bestimmen, wenn man die Stromstärke häufig beobachtet; dies geschieht z. B. beim Laden und Entladen von Akkumulatoren u. a. m. Zu demselben Zweck benutzt man registrierende Strommesser (156) oder Oszillographen (215,3). Die Fläche zwischen Stromkurve und Abszissenachse ist proportional der Elektrizitätsmenge.

Die von elektrischen Zentralstationen gelieferten Elektrizitätsmengen werden mit besonderen Instrumenten gemessen, vgl. Verbrauchsmessung (259 u. f.).

Wechselstromwiderstände.

(186) Selbstinduktivitäten. Wird an eine beliebig geartete Spule eine sinusförmige Wechselspannung E gelegt, so entsteht ein Strom I, der in der Phase um den Winkel φ gegen die Spannung nach rückwärts verschoben ist. Man nennt (109):

$R_s = E/I$ den Scheinwiderstand.

$R_w = (E/I) \cos\varphi$ den Wirkwiderstand,

$R_b = (E/I) \sin\varphi$ den Blindwiderstand.

Es ist: $R_s^2 = R_w^2 + R_b^2$; $R_w = R_s \cos\varphi$; $R_b = R_s \sin\varphi$.

Im allgemeinen sind R_w und R_b in mehr oder weniger komplizierter Weise von der Stromstärke und der Frequenz abhängig.

Ist dagegen die Spule so gebaut, daß

a) weder in der Umgebung des Stromleiters sich magnetisierbare Substanzen befinden, noch der Stromleiter selber aus einer magnetisierbaren Substanz besteht,

b) weder in benachbarten Metallteilen, noch in dem Metall des Stromleiters selber Wirbelströme entstehen können,

c) die Spule keine merkliche Kapazität besitzt,

so stimmt R_w mit dem ohmischen Gleichstromwiderstand überein, und R_b ist proportional der Frequenz:

$$R_b = 2\pi f \cdot L$$

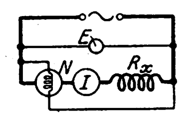
L ist in diesem Fall konstant und heißt die Selbstinduktivität der Spule.

Eine „reine“ SI ist z. B. eine auf ein nichtleitendes Material gewickelte Spule, deren Drähte nicht massiv sind, sondern aus einer größeren Zahl feiner, voneinander isolierter Drähte zusammengedrillt sind; vgl. (99,3 und 4).

Im allgemeinen müssen aber Wirk- und Blindwiderstände mit der Stromstärke und der Frequenz gemessen werden, mit der sie gebraucht werden sollen.

(187) Messung der Induktivität aus Strom I, Spannung E und Leistung N (Schaltung s. Abb. 57 a u. b). Aus den abgelesenen Werten von E, I und N ergibt sich

$$R_w = N/I^2; \qquad R_s = E/I; \qquad R_b = \sqrt{R_s^2 - R_w^2}.$$



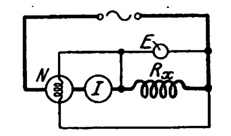


Abb. 57a und b.

Man muß prüfen, inwieweit der Eigenverbrauch der Meßapparate zu berücksichtigen ist.

Schaltung a) Strommesser und Hauptstromspule des Leistungsmessers haben zusammen den Wirkwiderstand r_i und den Blindwiderstand x_i. Dann ist als

Korrektion von N abzuziehen $\quad r_i I^2$,

von E abzuziehen $\quad I(r_i \cos\varphi + x_i \sin\varphi)$, $\quad$ wo $\cos\varphi = \frac{N}{EI}$ ist.

Schaltung b) Spannungsmesser und Spannungskreis des Leistungsmessers haben zusammen den Wirkleitwert g_e und den Blindleitwert y_e. Dann ist als

Korrektion von N abzuziehen $\quad g_e E^2$,

von I abzuziehen $\quad E(g_e \cos\varphi + y_e \sin\varphi)$.

Über Berücksichtigung der Kurvenform s. Bull. Bur. of Stand. 1, S. 125, 1905.

(188) Die Wheatstonesche Brücke wird zum Vergleich zweier Selbstinduktivitäten oder zum Vergleich einer Selbstinduktivität mit einer Kapazität gebraucht.

Sollen die Induktivitäten für den stationären Zustand gemessen werden, so bringt man in den Hauptzweig eine Gleichstromquelle, in den Brückenzweig ein ballistisches Galvanometer. Soll mit Wechselstrom untersucht werden, so kommen in den Hauptzweig Wechselstromquellen, welche zweckmäßig so eingerichtet sind, daß sie während der Versuche konstante, im übrigen aber stark veränderbare Periodenzahlen hervorbringen können. Dazu eignen sich a) Saitenunterbrecher, bei denen die Schwingungen einer abstimmbaren Saite zur Unterbrechung eines Gleichstroms benutzt werden (M. Wien, Wied. Ann. Bd. 44, S. 683, 1891), b) Summer (Dolezalek, Zeitschr. Instrk. Bd. 23, S. 243, 1903), Larsen, ETZ 1911, S. 284, c) kleine Hochfrequenzmaschinen (M. Wien, Ann. d. Phys. (4) Bd. 4, S. 426, 1901, Dolezalek (a. a. O.); Hartmann & Braun, Phys. Zeitschr. Bd. 10, S. 1018, 1909 und Arch. f. El. Bd. 3, S. 75, d) Hochvakuumröhren s. (81a, vorletzter Absatz).

In den Brückenzweig der Wheatstoneschen Brücke schaltet man ein Hörtelephon oder, wenn die Einstellung von der Periodenzahl abhängt, besser ein Vibrationsgalvanometer (149).

Um Störungen, die durch die Kapazität der ganzen Meßanordnung entstehen können, auszuschließen, bringt man den Brückenzweig auf das Potential Null gegen Erde ohne im übrigen die Stromverteilung zu stören. Am einfachsten wird dies dadurch erreicht, daß man zu der ganzen Verzweigung einen weiteren Zweig parallel schaltet, der aus denselben Wechselstromwiderständen, wie die parallelen Zweige der Brückenanordnung besteht und in diesem Zweige die Stoßstelle der beiden Widerstände erdet (Abb. 58, Punkt A) (K. W. Wagner, ETZ 1911. S. 1001). Über das Absieben von Oberschwingungen s. K. W. Wagner, Arch. f. El. Bd. 3, S. 74.

a) Vergleich zweier Selbstinduktivitäten (Abb. 58). Zweig 1 enthält die unbekannte Selbstinduktivität, deren „wirksame“ SI x sei, Zweig 2

eine „reine" bekannte SI vom Betrage L; zu Zweig 1 oder 2 kann nach Bedarf ein induktionsloser Widerstand zugeschaltet werden; es sei r_1 der gesamte wirksame Widerstand von Zweig 1, r_2 der gesamte ohmische Widerstand von Zweig 2. Zweig 3 und 4 bestehen aus induktionslosen Widerständen r_3 und r_4. Dann lautet die Nullbedingung für den Brückenzweig $x : L = r_1 : r_2 = r_3 : r_4$.

Für L nimmt man entweder Normalrollen (vgl. M. Wien, Wied. Ann. Bd. 58, S. 553, 1896 und Dolezalek, Ann. d. Phys. (4) Bd. 12, S. 1142, 1903) oder Selbstinduktionsvariatoren (vgl. M. Wien, Wied. Ann. Bd. 57, S. 249, 1896; Hausrath, Zeitschr. Instrk. Bd. 27, S. 302, 1907; Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes; Bull. Bur. of St. 1916, S. 569). Diese bestehen aus einem festen und einem beweglichen Spulensystem, von denen das letztere um einen Durchmesser des ersteren drehbar ist; jeder gegenseitigen Lage, die an einem Teilkreis abgelesen wird, entspricht ein bestimmter Wert der Selbstinduktivität. Zweig 3 und 4 wird zweckmäßig durch einen Schleifdraht gebildet, der für genauere Messungen durch Zusatzwiderstände an den Enden gewissermaßen verlängert werden kann (173).

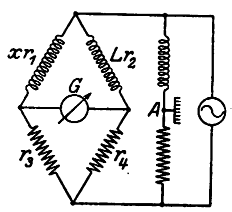


Abb. 58. Vergleich zweier Selbstinduktivitäten.

Durch abwechselndes Verschieben des Schleifkontaktes und Drehen der Variatorenspule oder, wenn statt der Variatoren eine Normalspule benutzt wird, durch Regulieren des zwischen Zweig 1 und 2 geschalteten induktionslosen Widerstandes wird die Nulleinstellung herbeigeführt. Dann wird x aus Lr_3/r_4 berechnet.

Ist die zu messende SI nicht rein, so ist auf die Stromstärke und bei Wechselstrom auch auf die Frequenz zu achten. Erstere findet man am bequemsten durch einen geeigneten Strommesser im Hauptzweig; gibt dieser den Strom I an, so ist, wenn die Brücke abgeglichen ist, der Strom im Zweige 1 gleich $Ir_4/(r_3+r_4)$, und zwar gleichgültig, ob mit Gleichstrom oder Wechselstrom gemessen wird.

Wird mit Wechselstrom gemessen, so findet man den wirksamen Widerstand der Spule aus $r_1 = r_2 r_3/r_4$. Macht man nach Beendigung der Wechselstrommessung eine Gleichstrommessung, so muß man r_2 um den Betrag δ verkleinern, um das in die Brücke geschaltete Galvanometer stromlos zu machen, d. h. der ohmische Widerstand der Spule ist gleich $(r_2 - \delta)\, r_3/r_4$. Der Wert $\delta r_3/r_4$ mit dem Quadrate des die Spule ursprünglich durchfließenden Wechselstromes (effektiv gemessen) multipliziert, ergibt somit die in der Sekunde durch Hysterese und Wirbelströme verloren gehende Energie in Watt.

Besondere Aufmerksamkeit wegen der zahlreichen Fehlerquellen erfordert die Messung sehr kleiner SI, z. B. einfacher Drahtringe, gerader Drähte, wie sie u. a. bei der drahtlosen Telegraphie gebraucht werden. Auch hierfür ist die vorstehende Methode brauchbar, wobei man zweckmäßig mit dem Brückenverhältnis 1 : 10 bis 1 : 100 arbeitet (vgl. Prerauer, Wied. Ann. Bd. 53, S. 772, 1894). Über die Messung kleiner SI bei verhältnismäßig großen Widerständen s. Giebe, Ann. d. Phys. (4) Bd. 24, S. 941, 1907. Wagner und Wertheimer, Phys. Zschr. 1912, S. 368. Schering u. Schmidt, Arch. f. El. 1, S. 423. Grover u. Curtis, Bull. Bur. of. St. 8, Nr. 3, 1912. Über die Anwendung der Thomsonbrücke zur Messung kleiner Induktivitäten s. Schering, ETZ 1917, S. 421, 436.

Meßbrücken für große und kleine SI nach Dolezalek von Siemens & Halske, Zeitschr. Instrk. Bd. 23, S. 246, 1903.

b) Vergleich einer SI L mit einer Kapazität C (Abb. 59a). Zweig 1 enthält die SI L vom Widerstand r_1; die übrigen Zweige enthalten induktionslose Widerstände $r_2\, r_3\, r_4$; zu r_4, das dem Zweige 1 gegenüberliegt, ist die Kapazität C parallel geschaltet. Der Brückenstrom ist gleich Null, wenn

$$r_1/r_2 = r_3/r_4 \text{ und } L/C = r_2 r_3 \text{ ist.}$$

Mit dieser Methode lassen sich dieselben Messungen wie unter a) ausführen, nur daß man als Normal statt einer Induktionsrolle eine Kapazität benutzt.

Der letzten Anordnung ähnlich ist die von Anderson (vgl. Abb. 59b); man gleicht zunächst mittels Gleichstrom und Galvanometer die Brücke ab, d. h. $r_1 : r_2 = r_3 : r_4$. Dann schickt man Wechselstrom in die Verzweigung und reguliert den Widerstand R so lange, bis das Telephon schweigt, dann ist:

$$L/C = R(r_1 + r_2) + r_2 r_3.$$

Über absolute Messung einer Selbstinduktion in der Brücke s. Max Wien, (Wied. Ann. Bd. 58, S. 553, 1896).

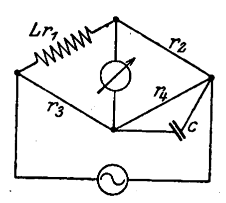


Abb. 59a. Vergeich einer Selbstinduktivität mit einer Kapazität.

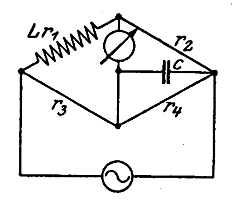


Abb. 59b. Andersonsche Methode.

(189) Vergleich zweier Selbstinduktivitäten mit dem Differentialtelephon. Auf einen Eisenkern sind zwei genau einander gleiche Wicklungen (1, 2) zusammen aufgewickelt (Abb. 60). Werden beide Wicklungen mit entgegengesetzter Stromrichtung an eine Wechselstrommaschine M angeschlossen, so wird die Induktion im Eisen aufgehoben, wenn Selbstinduktionen L L und Widerstände r r in den beiden äußeren Kreisen einander gleich sind; das Verschwinden der Induktion wird an einer tertiären (3) Wicklung mittels Telephons T beobachtet. Man kann auf diese Weise eine unbekannte SI mit einem Normal vergleichen. Gibt man den beiden primären Wicklungen verschiedene Windungszahlen, so müssen sich SI und Widerstände wie die Windungszahlen verhalten. Die Methode eignet sich zur Messung der Induktivität eisenhaltiger Spulen in Maschinen und Transformatoren. (s. Hausrath, Unters. elektr. Systeme, S. 61. J. Springer. Berlin 1907. Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes.)

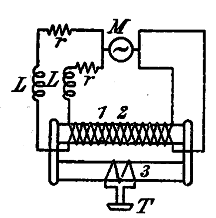


Abb. 60. Vergleich zweier SI mit Differentialtelephon.

(190) Gegeninduktivitäten. a) Man schickt in die primäre Wicklung den gemessenen Gleichstrom I, wendet den Strom und mißt mittels ballistischen Galvanometers den Stromstoß Q, der in der sekundären Wicklung induziert wird. Ist R_2 der Gesamtwiderstand des sekundären Kreises, so ist die Gegeninduktivität $M = Q \cdot R_2/2\,I$. Über die Eichung des ballistischen Galvanometers s. (184).

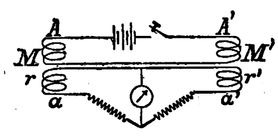


Abb. 61. Vergleich zweier Gegeninduktivitäten.

Einen direkten Vergleich von zwei Gegeninduktivitäten erhält man auf folgendem Wege:

Die Gegeninduktivität der Rollen A und a sei bekannt und $= M$; diejenige der Rollen A' und a' unbekannt $= M'$; M' soll mit M verglichen werden. Man schaltet nach Abb. 61. Sollen die Induktivitäten für stationäre Zustände verglichen werden, so benutzt man eine Gleichstromquelle und ein ballistisches

Galvanometer; beim Vergleich mit Wechselstrom eine Wechselstromquelle und ein Telephon oder Vibrationsgalvanometer. Man stellt auf verschwindenden Strom ein; Bedingung dafür ist $M : M' = L : L' = r : r'$; darin sind L und L' die Selbstinduktivitäten der sekundären Spulen. Man muß also unter Umständen zu a und a' Ballastvariatoren hinzufügen.

b) Ist M die Gegeninduktivität zweier Spulen, deren Selbstinduktivitäten L_1 und L_2 sein mögen, so mißt man zunächst nach einer der Methoden (187, 188) die Selbstinduktivität L' der hintereinander geschalteten Spulen, wobei die Ströme in beiden Spulen einander gleichgerichtet sein sollen; dann ist $L' = L_1 + L_2 + 2M$. Dreht man die Stromrichtung in einer der Spulen um, so findet man auf demselben Wege $L'' = L_1 + L_2 - 2M$; daraus ergibt sich: $M = 1/4\,(L' - L'')$.

Über andere Methoden, namentlich solche mit Hilfe von Variatoren für Gegeninduktivitäten Campbell, Nat. phys. Lab. coll. res. Bd. 4, S. 223, 1908.

Kapazität.

(191) Vergleichung von Kapazitäten. Die beiden Kondensatoren werden miteinander verbunden, um sie auf gleiches Potential zu bringen; sie werden geladen und voneinander getrennt. Darauf entlädt man sie nacheinander durch ein ballistisches Galvanometer (184). Die Ausschläge des Galvanometers geben das Verhältnis der Kapazitäten an.

Oder man mißt nur die Differenz ihrer Kapazitäten nach der Schaltung Abb. 62 (Thomsonsche Methode); r_1 und r_2 sind große Widerstände, e ein verschiebbarer Erdkontakt. Zunächst werden die Verbindungen ap und bq hergestellt und die Kondensatoren geladen. Dann werden diese Verbindungen aufgehoben und pm und nq verbunden; die Ladungen gleichen sich bis auf einen Rest aus, der gemessen wird, indem man r mit s verbindet. Verschiebt man e so lange, bis der Rest gleich null ist, so gilt $C_1 : C_2 = r_2 : r_1$.

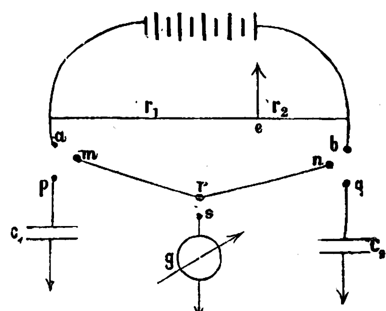


Abb. 62. Vergleich zweier Kapazitäten mit Galvanometer.

(192) Messung der Kapazität in der Wheatstoneschen Brücke mit Wechselstrom. Man vergleicht am besten die unbekannte Kapazität nach (188 b) mit einer Normalrolle der Selbstinduktion und führt die Messungen bei verschiedenen Periodenzahlen aus.

Der Vergleich zweier Kapazitäten untereinander wird in der Wheatstoneschen Brücke nach Abb. 63 unter Benutzung von Wechselstrom ausgeführt. $C_1 : C_2 = r_4 : r_3$ ist die Bedingung für Schweigen des Telephons. Dabei ist vorausgesetzt, daß im Kondensator keine Energieverluste auftreten (dielektrische Hysterese). Ist letzteres der Fall, so kann man sich einen solchen Kondensator durch einen verlustlosen von der Kapazität C ersetzt denken, dem ein Widerstand ϱ (Verlustwiderstand) vorgeschaltet ist. Dann muß man auch in Zweig 1 und 2 Widerstände $\varrho_1 \varrho_2$ zuschalten, um die Brücke ins Gleichgewicht zu bringen. Bedingung ist: $C_1 : C_2 = (r_2 + \varrho_2) : (r_1 + \varrho_1) = r_4 : r_3$. Statt der Verlustwiderstände gibt man häufig die Verlustwinkel δ an, wo $\delta = \omega C \varrho$ ist (ω Kreisfrequenz). (43, 80).

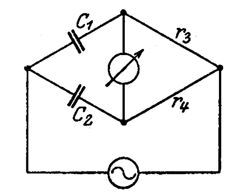


Abb. 63. Vergleich zweier Kapazitäten mit Wechselstrom.

Über Messung mit Hochfrequenz: Seibt Zschr. f. Schwachstr. 1911, S. 654.

Über die absolute Messung einer Kapazität s. Maxwell (Electr. II, § 557), J. J. Thomson, Phil. Tr. Bd. 174, S. 707, 1883; Giebe, Zeitschr. Instrk. 1909, S. 205, 269, 301.

(193) Resonanzmethode. Bei Anwendung von Wechselströmen höherer Frequenz benutzt man am besten eine Resonanzmethode. Man schließt die zu messende Kapazität und eine passende Induktivität zu einem Kreise und erregt diesen mit Hochfrequenz [am besten durch eine Hochvakuumröhre (81)]; die Resonanzlage wird z. B. durch Detektor mit Galvanometer festgestellt. Um von den besonderen Eigenschaften des Schwingungskreises unabhängig zu werden, ersetzt man die unbekannte Kapazität durch einen geeichten Drehkondensator und stellt mit diesem die Resonanzlage wiederum ein. Seine Kapazität ist dann gleich der unbekannten.

(194) Kapazität von Spulen. Größere Spulen besitzen eine gewisse Eigenkapazität; sie verhalten sich bis zu hohen Frequenzen wie Spulen ohne Kapazität, denen ein Kondensator von der Kapazität C parallel geschaltet ist. Man bestimmt C, indem man die Spulenklemmen durch ein Heliumröhrchen überbrückt und den so gebildeten Kreis mit einem Hochfrequenzgenerator von regulierbarer Frequenz induktiv koppelt. Man bestimmt die Wellenlänge λ, bei der das Röhrchen aufleuchtet (Resonanz) durch einen geeigneten Wellenmesser, dann ist:

$$C = \lambda^2 / 36 \pi^2 \cdot 10^{10} L.$$

C in μF, λ in m, L in H (Ann. d. Phys. Bd. 41, S. 543).

(195) Die Dielektrizitätskonstante ε wird bestimmt durch die Vergleichung eines Plattenkondensators, der erst mit Luft und dann mit dem zu untersuchenden Stoffe gefüllt ist, mit einem anderen, ihm nahezu gleichen Kondensator. Zur Vermeidung der Streuung müssen die Endplatten dem gleichen Pol angehören (Grüneisen u. Giebe, Verh. d. phys. Ges. 1912, S. 921).

Ist C_0 die Kapazität des mit Luft gefüllten Kondensators, C diejenige des mit dem zu untersuchenden Dielektrikum gefüllten, so ist $\varepsilon = C/C_0$. Dabei ist vorausgesetzt, daß das Dielektrikum den Raum zwischen den Platten vollständig ausfüllt. Dies ist bei Flüssigkeiten immer der Fall, bei festen Körpern in der Regel nicht. Besitzt der Kondensator einen Plattenabstand a, und ist die Dicke des eingeschobenen festen Körpers d, so ist: $1/\varepsilon = 1 - (a/d) \cdot (C - C_0)/C$.

Die Resultate werden fehlerhaft, wenn die Dielektriken nicht vollkommen isolieren.

(196) Dielektrizitätskonstanten von unvollkommenen Isolatoren werden nach Methoden von Nernst gefunden.

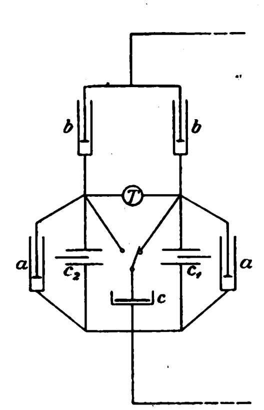
a) Kompensation des Leitvermögens. Die Schaltung ist im wesentlichen die gleiche wie in (195). Der Versuchskondensator c (Abb. 64), dessen Boden zur Erde abgeleitet ist, besitzt einen konstanten Plattenabstand. Er kann entweder zu dem konstanten Hilfskondensator c_2 oder zu dem meßbar variierbaren Kondensator c_1 parallel geschaltet werden. Letzterer besteht aus einem Plattenkondensator mit verschiebbarer Glasplatte; die Abhängigkeit der Kapazität von der Stellung der Glasplatte ist durch besonderen Versuch bestimmt. Den Kondensatoren parallel geschaltet sind regulierbare Flüssigkeitswiderstände a a, welche ein eventuelles Leitvermögen des Dielektrikums kompensieren sollen. Die übrigen beiden Zweige der Wheatstoneschen Brücke werden ebenfalls durch zwei regulierbare, einander gleiche Flüssigkeitswiderstände b b gebildet. Man schaltet zunächst c luftgefüllt parallel zu c_2 und reguliert c_1 und die Widerstände, bis das Telephon schweigt. Danach wird c parallel zu c_1 geschaltet und von neuem eingestellt. Durch die Verschiebung der Glasplatte von c_1 wird das Doppelte der Kapazität c einschl. Zuleitungen gefunden.



Füllt man nun den Kondensator mit einer Flüssigkeit von der bekannten Dielektrizitätskonstanten ε_0, so findet man durch dieselbe Methode die Kapazität c_0. Schließlich wird die Kapazität c_x des mit einer Flüssigkeit von der Dielektrizitätskonstanten ε_x gefüllten Kondensators gemessen; dann folgt

$$2\varepsilon_x - 1 = (\varepsilon_0 - 1)\cdot(c_x - c)/(c_0 - c).$$

b) Messung in der Wheatstoneschen Brücke mittels sehr schneller Schwingungen. Die raschen Schwingungen werden mittels Induktors $E\,E$ (Abb. 65), Glasplattenkondensators G und Lufttransformators T erzeugt. Zwei Zweige der Wheatstoneschen Brücke werden durch zwei einander annähernd gleiche Leidener Flaschen $a\,a$ gebildet. c ist der Versuchskondensator, c' der mittels der Glasplatte regulierbare (vgl. 196a). Als Indikator der Stromlosigkeit in der Brücke dient eine Funkenstrecke f, die durch zwei fein einstellbare, aufeinander senkrechte Platinschneiden gebildet wird.



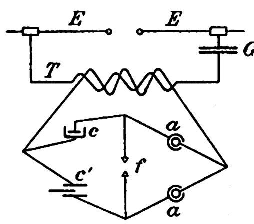


Abb. 64 und 65. Dielektrizitätskonstante unvollkommener Isolatoren.

Es wird ebenso wie unter a) eine Messung an dem mit Luft gefüllten Kondensator gemacht. Dann wird der Kondensator mit einer Flüssigkeit von bekannter Dielektrizitätskonstanten gefüllt und schließlich mit der zu untersuchenden Flüssigkeit. Die Berechnung erfolgt nach derselben Formel wie unter a). S. auch Phys. Zschr. 17, S. 117.

Literatur: Orlich, Kapazität und Induktivität. Braunschweig 1909.

Wechselstrommessungen.

(197) Spannung, Strom, Leistung. Effektive Spannung und effektive Stromstärke werden wie bei Gleichstrom durch geeignete Spannungs- und Strommesser gemessen. Während aber bei Gleichstrom die Leistung durch einfache Multiplikation der getrennt gemessenen Werte von Strom und Spannung erhalten wird, ist bei Wechselstrom zu beachten, daß, sobald Strom und Spannung in der Phase um den Winkel φ gegeneinander verschoben sind, die Leistung gleich $E\,I\cos\varphi$ ist; vgl. (105). Die Messung der Leistung von Wechselströmen erfordert somit besondere Methoden und Apparate.

(198) Methoden der Leistungsmessung. Die Leistung eines Wechselstromes $E\,I\cos\varphi$ wird am einfachsten durch geeignete Leistungsmesser ermittelt, die gewöhnlich aus zwei Stromkreisen bestehen: dem Hauptstromkreis, der vom Arbeitsstrom I durchflossen wird, und dem Spannungskreis, an den die Spannung E gelegt wird. Die Leistungsmesser werden je nach Art der zu messenden Leistung verschieden geschaltet.

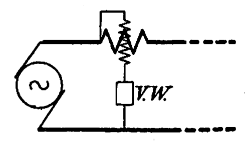


a) Einphasiger Wechselstrom. Es bedeute N die Angabe des Leistungsmessers, p_s den Eigenverbrauch des Leistungsmessers im Spannungskreis (z. B. beim Dynamometer $i^2 \times$ Gesamtwiderstand des Spannungskreises), p_h den Eigenverbrauch des Leistungsmessers im Hauptstromkreis (beim Dynamometer $I^2 \times$ wirksamer Widerstand der Hauptstromspule); dann ist:

Schaltung Abb.	Abgegebene Leistung einer Energiequelle	Verbrauch in einer Belastung
66	$N+p_s$	$N-p_h$
67	$N+p_h$	$N-p_s$

Über die Zweckmäßigkeit der einen oder der anderen Schaltung s. v. Studniarski, ETZ Bd. 30, S. 821.

b) Zur Messung der gesamten Leistung eines beliebig belasteten Drehstromsystems sind zwei Leistungsmesser erforderlich, die nach Abb. 68 angeordnet werden, und zwar gleichgültig, ob die Belastung in Stern oder



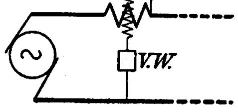


Abb. 66 und 67. Schaltung von Leistungsmessern.

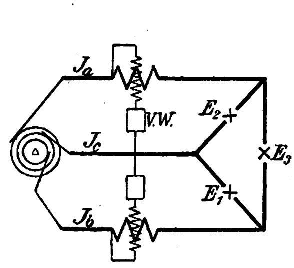


Abb. 68. Drehstromleistung (Aronsche Schaltung).

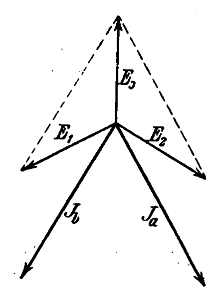


Abb. 69. Drehstromdiagramm für induktionslose Last.

in Dreieck geschaltet ist. Die Gesamtleistung ist gleich der Summe der Wattmeterangaben. Im Diagramm (Abb. 69) sind die für die Leistungsmessungen in Betracht kommenden Teilspannungen E_1 E_2 sowie die Teilströme $I_b I_a$ für den Fall einer gleichmäßigen induktionslosen Belastung in allen drei Phasen eingezeichnet. Wird die Belastung gleichmäßig und induktiv, so hat man die Ströme $I_b I_a$ gegen das Spannungskreuz um den der induktiven Belastung entsprechenden Phasenwinkel φ zu verschieben. Für $\varphi = 60°$ wird der Ausschlag des einen Leistungsmessers gleich Null; ist φ noch größer, so hat man die Richtung des Spannungsstromes in letzterem Wattmeter umzudrehen und seine Angaben negativ in Rechnung zu setzen. Es sind Umschalter konstruiert worden (S. & H.), durch welche derselbe Leistungsmesser nacheinander in zwei der Hauptleistungen gelegt wird. Sind bei gleichmäßiger Belastung in den drei Phasen N_1 und N_2 die in der Schaltung Abb. 68 gemessenen Teilleistungen, so wird die Phasenverschiebung zwischen Strom und zugehöriger Spannung in der Belastung berechnet aus:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3}\,\frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}\,.$$

Gleichbelastetes Drehstromsystem. Sind die Belastungen in den drei Zweigen nach Stromstärke und Phase einander gleich, so genügt zur Messung der Gesamtleistung ein Wattmeter, das nach Abb. 70 geschaltet wird. Die Spannungsspule liegt in dem sog. Sternschaltungswiderstand; die drei Widerstände zwischen den drei Polen der Drehstromleitung und dem „künstlichen Nullpunkt" N sind einander gleich. Beträgt jeder $R\ \Omega$ und ist K die Konstante des dynamometrischen Leistungsmessers (203), so ist die Gesamtenergie des gleichmäßig belasteten Drehstromsystems gleich $3KR \cdot \alpha$.

c) Drehstromsystem mit viertem Leiter. Besitzt das Drehstromsystem einen vierten „neutralen Leiter", der vom Sternpunkt der Energiequelle ausgeht, so braucht man für eine strenge Messung der Gesamtleistung 3 Leistungsmesser, deren Hauptstromspulen in die 3 Außenleiter gelegt werden, während die Spannungskreise zwischen Außenleitern und neutralem Leiter liegen. Vereinfachte Schaltungen s. ETZ 1901, S. 214, und 1903, S. 976. Genaue Formeln bei Orlich, ETZ 1907, S. 71.

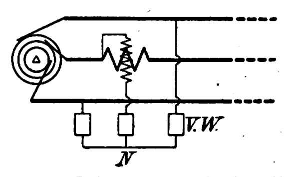


Abb. 70. Leistung eines gleichmäßig belasteten Drehstromsystems.

(199) Methode der drei Spannungsmesser. Um die zwischen den Punkten ab eines Stromkreises verbrauchte Leistung zu finden, wird hinter dem Verbrauchskreis zwischen die Punkte b und c der induktionslose Widerstand R geschaltet. Die Spannung zwischen ac sei gleich E, zwischen ab gleich E_1, zwischen bc gleich E_2. Dann ist die gesuchte Leistung gleich $(E^2 - E_1^2 - E_2^2)/2R$. Die Spannungsmessung führt man hier am besten mit statischen Voltmetern aus, um keine Fehler durch den Eigenverbrauch der Spannungsmesser zu erhalten (vgl. ETZ 1901, S. 98).

(200) Methode der drei Strommesser (Fleming). Schaltet man zum Verbrauchskreis einen induktionslosen Widerstand R parallel, nennt den unverzweigten Strom I, die Ströme in der Verbrauchsleistung und in dem induktionslosen Widerstand bzw. $I_1 I_2$, so ist die gesuchte Leistung gleich $\frac{1}{2} R (I^2 - I_1^2 - I_2^2)$.

(201) Die Wechselstrommeßapparate zur Messung von Spannung, Stromstärke und Leistung zerfallen in zwei Klassen:

I. Diejenigen Apparate, die für Gleichstrom und Wechselstrom die gleichen Angaben machen. Die mit Gleichstrom geprüften Apparate können ohne weiteres mit Wechselstrom gebraucht werden; zuweilen ist eine berechenbare Korrektion erforderlich. Hierhin gehören die Dynamometer, Elektrometer und Hitzdrahtapparate.

II. Diejenigen Apparate (bzw. Hilfsapparate), die nur auf Wechselstrom ansprechen. Die im beweglichen System fließenden Ströme werden durch Induktion erzeugt; das bewegliche System bedarf somit keiner Zuleitungen. Die Angaben sind mehr oder weniger von der Frequenz abhängig; diese Apparate müssen in der Regel mittels der Apparate der vorhergehenden Klasse geprüft werden. (Induktionsmeßgeräte, Strom- und Spannungswandler.)

(202) I. Apparate für Gleichstrom und Wechselstrom. a) Die Dynamometer [vgl. (144) bis (147)] sind als Spannungsmesser, Strommesser und Leistungmesser brauchbar.

Sämtliche Spulen des dynamometrischen Spannungsmessers sind hintereinander geschaltet; die Kraftwirkung der Spulen aufeinander ist somit proportional dem Quadrat des effektiven Spannungsstromes. Wird also dem Dynamometer ein induktionsloser Widerstand vorgeschaltet, so erhält man einen Apparat zur Messung der effektiven Spannungen; da aber für Wechselstrom nicht der ohmische Widerstand des Spannungskreises R, sondern der Scheinwiderstand $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ in Frage kommt, so ist eigentlich eine Korrektion der Wechselstrommessung erforderlich. Diese Korrektion ist aber meistenteils, namentlich bei der

Messung höherer Spannungen, zu vernachlässigen, weil die Selbstinduktivität der Spulen (gewöhnlich von der Größenordnung 0,01 — 0,1 H) gegenüber dem induktionslosen Vorschaltwiderstand zu gering ist. Die Abweichung ist bei einem Strom der Frequenz 50 kleiner als ein Tausendstel, wenn $L \leqq 6 \cdot 10^{-6} R$ ist.

Es werden direkt zeigende dynamometrische Präzisionsvoltmeter für Gleich- und Wechselstrom gebaut, bei denen feste und bewegliche Spule mit einem induktionslosen Widerstand hintereinander geschaltet sind. Die bewegliche Spule ist in Spitzen gelagert und trägt einen über einer ungleichmäßigen Skale spielenden Zeiger. Die Stromzuführungen zur beweglichen Spule erfolgen durch zwei flache Spiralfedern, die gleichzeitig die Richtkräfte liefern (ETZ 1900, S. 399 und S. 891).

Der kleinste Meßbereich, für den direkt zeigende Spannungsmesser gebaut werden, ist 15 V; der Stromverbrauch dieser Apparate beträgt etwa 0,5 A.

Dynamometrische Strommesser. Größere Vorsicht erfordert die Verwendung des Dynamometers im Nebenschluß als Strommesser. Man kann es zweckmäßig in der Weise verwenden, daß man feste und bewegliche Spule unter Vorschaltung geeigneter Widerstände in beiden Zweigen einander parallel schaltet. Die Angaben eines derartig geschalteten Dynamometers sind von der Periodenzahl unabhängig und können nach der für die Gleichstromeichung in dieser Schaltung gefundenen Konstanten berechnet werden, wenn das Verhältnis von Widerstand zur Selbstinduktion für beide parallel geschaltete Zweige dasselbe ist (vgl. M. Wien, Wied. Ann., Bd. 63, S. 390; Journ. Inst. El. Eng. 48, S. 515, 1912).

Diese Schaltung wird angewandt bei den direkt zeigenden Präzisions-Amperemetern für Gleich- und Wechselstrom von Siemens & Halske und der AEG. (ETZ 1900, S. 399 und S. 891); diese sind für maximale Ströme von 0,03 A bis 200 A konstruiert und können zwei mittels Stöpsel umschaltbare Meßbereiche enthalten, die sich wie 1 : 2 verhalten. Über eine besondere Form von Dynamometern mit Spanndrahtaufhängung und nahezu gleichmäßiger Skale zur Strommessung (Meßbereiche 0,015 A bis 5 A) s. Bruger, ETZ 1904, S. 822 (Hartmann & Braun).

(203) Dynamometrische Leistungsmesser. Man schickt den Hauptstrom I durch die festen Spulen und schließt die bewegliche unter Vorschalten eines geeigneten induktionslosen Widerstandes wie einen Spannungsmesser an die Spannung an. Bedeutet dann R den Gesamtwiderstand des Spannungskreises, so ist, wenn man die SI der Spannungsspule vernachlässigt, der Spannungsstrom $i = E/R$.

Ist K (144, 145) die dynamometrische Konstante gemäß der Gleichung $K \cdot \alpha = I\,i$ gemessen, wo α den Ausschlag bedeutet, so ist die zu messende Leistung gegeben durch die Gleichung $N = K\,R \cdot \alpha$. Man hat also die Dynamometerkonstante mit dem jeweiligen Gesamtwiderstand des Spannungskreises (Spule + Vorschaltwiderstand) zu multiplizieren, um die Wattmeterkonstante zu erhalten.

Die so gefundene Wattmeterkonstante ist auch für Wechselstrommessungen gültig; besitzt aber die Spannungsspule eine größere SI L, so ist das Resultat noch zu multiplizieren mit $\left(1 \pm \frac{\omega L}{R} \cdot \operatorname{tg} \varphi\right)$, wo φ die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Hauptstrom bedeutet. Das negative Zeichen gilt, wenn der Strom in der Phase hinter der Spannung zurückbleibt, das positive, wenn er vorauseilt.

Fehlerquellen können bei der Verwendung mit Wechselstrom durch Wirbelströme zustande kommen, die in benachbarten Metallteilen oder in der Hauptstromspule selbst erzeugt werden. Deshalb ist es ratsam, möglichst nur die Stromleiter aus Metall herzustellen und stärkere Stromleiter in geeigneter Weise zu unterteilen.

Bei den direkt zeigenden dynamometrischen Wattmetern kann es durch geeignete Form bzw. Abmessung der Spulen erreicht werden, daß die Skale eine fast gleichmäßige ist; das bewegliche System besitzt eine Luftdämpfung, der Spannungsstrom beträgt in der Regel maximal 0,03 A.

Diese Apparate werden für Hauptstromstärken von 0,5 bis zu 400 A gebaut; die Hauptstromspule kann aus zwei oder vier einander gleichen Wicklungen hergestellt werden, die nebeneinander oder hintereinander geschaltet werden können. Man erhält somit Strommeßbereiche mit dem Verhältnis 1:2:4. Die Selbstinduktivitäten der Spannungsspulen sind so gering, daß die durch sie verursachte Korrektion praktisch vernachlässigt werden kann. Namentlich bei höheren Spannungen ist darauf zu achten, daß nur eine verhältnismäßig geringe Potentialdifferenz zwischen Spannungsspule und Hauptstromspule besteht; dementsprechend ist der Vorschaltwiderstand des Spannungskreises zu schalten.

Über ferrodynamische Leistungsmesser s. Dolivo-Dobrowolsky, ETZ 1913, S. 113.

Über ein Wattmeter für Drehstrom s. H. Sack, ETZ Bd. 28, S. 268, 1907. Über einen Fehler, der bei Hochspannungsmessungen durch statische Kräfte entstehen kann, s. Zenneck, Phys. Zschr. 1910, S. 896.

(204) b) Elektrometer eignen sich zu Spannungs- und Leistungsmessungen. Zu Spannungsmessungen wird das Elektrometer in der idiostatischen oder Doppelschaltung angewandt (vgl. 152, 3). Um einen kommutierten Ausschlag zu erhalten, hat man die Verbindungen nach Abb. 71 auszuführen. Eine mit Gleichspannung gemessene Konstante des Apparates ist für die Wechselstrommessungen ohne weiteres anwendbar, sofern nicht der Widerstand des Aufhängedrahtes zu groß ist (151). Mit einem Platinfaden von 0,005 mm Durchmesser kann man bei 2 m Skalenabstand für 1 V 130 Skalenteile kommutierten Ausschlag erhalten (Zeitschr. Instrk. 1904, S. 143). Über statische Voltmeter als direkt zeigende Apparate s. (153); sie zeichnen sich dadurch aus, daß sie keine Energie verbrauchen.

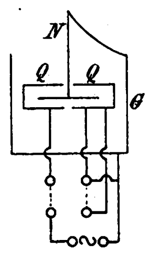


Abb. 71. Spannungsmessung mit Elektrometer.

Hat man eine Spannung zu messen, die über den Meßbereich des Voltmeters hinausgeht, so ist es am zweckmäßigsten, die zu messende Spannung durch einen großen Widerstand R zu schließen und das Voltmeter an eine Unterabteilung desselben von geeigneter Größe R_1 anzuschließen. Die Voltmeterangaben sind dann mit R/R_1 zu multiplizieren.

An Stelle eines Widerstandes kann man auch eine Reihe hintereinander geschalteter Kondensatoren nehmen (153). Doch kann man aus den Kapazitäten nur dann die Spannungen berechnen, wenn Kondensatoren sowohl wie Elektrometer einen sehr hohen Grad von Isolation besitzen. Ist die Kapazität des Elektrometers nicht verschwindend gegenüber den Kapazitäten der verwandten Kondensatoren, so ist sie in Rechnung zu setzen. Über die Messung kleiner Wechselspannungen mit Transformator und Elektrometer s. Gewecke, Arch. f. El. Bd. 7, S. 203.

(205) Leistungsmessungen mit dem Elektrometer werden zweckmäßig nur mit dem Spiegelelektrometer vorgenommen. Schaltung nach Abb. 72 (folg. Seite). Es wird der Ausschlag a beobachtet, der beim Wenden des Umschalters entsteht. Dann ist die zu messende Leistung in der Belastung gleich $Ka/R - \frac{1}{2}I^2R$, worin K die Elektrometerkonstante, R den NW bedeutet. K wird durch Messung in der Quadrantenschaltung unter Verwendung von Gleichspannung gefunden, wobei die Nadelspannung numerisch gleich der Betriebsspannung des Wechselstromes sein muß. $\frac{1}{2} I^2 R$ ist in der Regel nur eine Korrektion (vgl. Orlich, Zeitschr. Instrk, 1903, S. 97; 1909, S. 33 und ETZ 1909, S. 435, 466), Petersen, Arch. f. El. Bd. 1. S. 95; Journ. Inst. El. Eng. 51, S. 294, 1913.

Die Messungen mit dem Elektrometer kommen nur für Laboratorien in Frage. Ihr Vorteil besteht darin, daß in Verbindung mit einem geeigneten Satz von Widerständen mit demselben Elektrometer Messungen bei beliebig hohen Spannungen und großen Strömen gemacht werden können.

(206) c) Hitzdrahtapparate (150) werden unter Verwendung geeigneter Vorschalt- und Nebenschlußwiderstände als Strom- und Spannungsmesser gebraucht. Mit Gleichstrom geprüft, bedürfen ihre Angaben bei Wechselstrommessungen keiner weiteren Korrektion. Doch ist die erreichbare Genauigkeit nicht so groß wie bei den dynamometrischen Apparaten. Bei Hitzdrahtapparaten mit Nebenschlüssen ist, namentlich wenn es sich um höhere Frequenzen oder große Stromstärken handelt, sorgfältig auf die Leitungsführung zu achten, Abb. 73 (ausgezogene Linie richtige Leitungsführung, punktierte Linie falsche Leitungsführung). Vgl. auch (168).

Bei den Apparaten, welche thermoelektrische Kräfte benutzen (150 c) kommt unter Umständen durch den Peltiereffekt ein kleiner Unterschied zwischen den Angaben für Gleichstrom- und Wechselstrom zustande (Schering a. a. O.). Die Apparate können in Verbindung mit geeigneten Nebenschlüssen zur Messung jeder beliebigen Wechselstromstärke benutzt werden.

Über ein Hitzdrahtwattmeter s. ETZ 1903, S. 530.

(207) d) Weicheisenapparate machen im allgemeinen für Gleichstrom und Wechselstrom nicht die gleichen Angaben. Bei neueren Apparaten ist dieser Unterschied selbst bei Anwendung höherer Frequenzen nicht vorhanden. Die Apparate haben daher, zumal sie verhältnismäßig billig und unempfindlich gegen Überlastung sind, die weiteste Verbreitung gefunden.

(208) II. Apparate, die nur auf Wechselstrom ansprechen. a) Drehfeldmeßgeräte beruhen auf der Herstellung eines künstlichen Drehfeldes (Ferraris). Es kommen dabei dieselben Schaltungen wie bei den Induktionszählern in Frage (263), außerdem die 90°-Schaltung nach Görges und Schrottke (ETZ 1901, S. 657), welche eine Wheatstonesche Brückenverzweigung benutzt, und von Görner (ETZ 1899, S. 750). Die Schaltungen werden zur Konstruktion von Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern angewandt. Die Apparate zeichnen sich durch Unempfindlichkeit gegen störende Magnetfelder und große Drehmomente für die beweglichen Systeme aus.

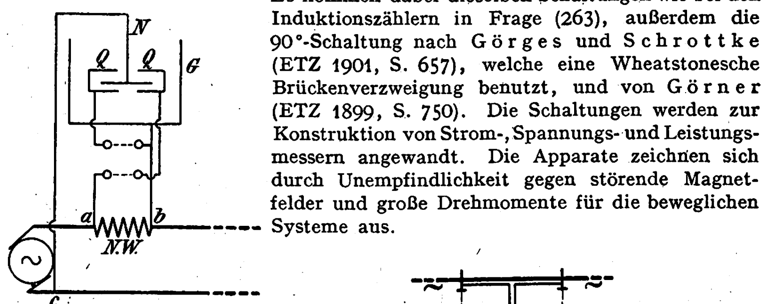


Abb. 72. Leistungsmessung mit Eektrometer.
N.W. induktionsfreier Normalwiderstand.
QQ Quadrantenpaar.
NG Nadel und Gehäuse.

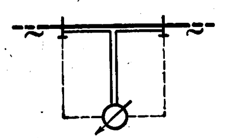


Abb. 73. Nebenschlußwiderstand für Wechselstrom.

b) Spannungs- und Stromwandler dienen bei Wechselstrommessungen denselben Zwecken, wie bei Gleichstrommessungen Vorschaltwiderstände für Spannungsmesser und Nebenschlußwiderstände für Strommesser.

Spannungswandler werden vorzugsweise zur Messung von Hochspannungen verwandt. Die zu messende Hochspannung wird an die primäre Wicklung des Spannungswandlers angeschlossen, ein passender Niederspannungsmesser an die sekundäre Wicklung; die Spannung wird im Verhältnis der Windungszahlen reduziert. Werden primäre und sekundäre Wicklung gut voneinander isoliert, so erreicht man den Vorteil, daß das Meßinstrument selber nicht mit der Hochspannungsleitung in Berührung ist.

Bei den Stromwandlern wird der Hauptstrom durch die primäre Wicklung geschickt, während an die sekundäre die Stromspule eines Amperemeters an-

geschlossen ist. Die Sekundärwicklung ist demnach fast kurz geschlossen, und die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen.

Stromwandler werden zur Messung hoher Stromstärken und zur Trennung der Strommesser von Hochspannungsleitungen angewandt. Wattmeter werden mit Strom- und Spannungswandlern ausgerüstet.

Das Übersetzungsverhältnis der Strom- und Spannungswandler stimmt infolge von Energieverlusten und Streuung nicht genau mit dem Sollwert überein. Auch sind die Ströme bzw. Spannungen des sekundären Kreises in der Phase nicht genau entgegengesetzt gerichtet denen des primären, sondern weichen um einen kleinen Winkel ab. Die Größe dieser Abweichungen hängt von der Größe der Belastungen der sekundären Kreise ab. Besonders empfindlich sind darin die Stromwandler. Über die zulässige Abweichung bei der Beglaubigung ETZ 1915, S. 358.

Die Phasenverschiebung in den Meßtransformatoren macht sich bei der Leistungsmessung bemerklich. Sei ein Leistungsmesser mit Strom- und Spannungswandler ausgerüstet, und seien δ_i und δ_e die kleinen Winkel (in Minuten gemessen) um welche die sekundären Vektoren gegen die primären nach vorwärts verschoben sind; dann sind zu den Angaben des Leistungsmessers

$$2{,}9\,(\delta_e - \delta_i)\cdot \operatorname{tg}\varphi \text{ Proz.}$$

zu addieren. Dabei ist $\cos\varphi$ der Leistungsfaktor der mit dem Leistungsmesser zu messenden induktiven Belastung. Es entsprechen sich die Werte:

$\cos\varphi =$ 1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$\operatorname{tg}\varphi =$ 0	0,45	0,75	1,02	1,33	1,73	2,29	3,18	4,90	9,95 .

Bei normalem Betriebe ist die Kraftliniendichte im Stromwandler sehr gering. Wird er dagegen, während er primär von Strom durchflossen wird, sekundär geöffnet, so steigt die magnetische Induktion sehr stark und kann ihn so stark erwärmen, daß er dadurch beschädigt wird. Da auch eine kurze Öffnung des sekundären Kreises eine Änderung von Übersetzungsverhältnis und Phasenabweichung zur Folge haben kann, so muß die Regel befolgt werden, daß ein primär erregter Stromwandler sekundär **nie offen** sein darf.

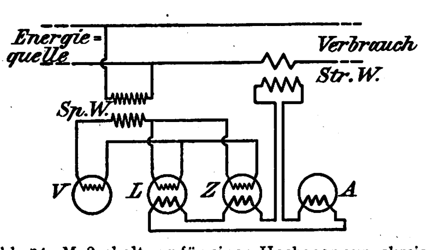


Abb. 74. Meßschaltung für einen Hochspannungskreis.

Man kann an Meßtransformatoren gleichzeitig mehrere Apparate anschließen, und zwar werden die Spannungskreise an die Spannungswandler einander parallel, die Hauptstromspulen der Apparate an die Stromwandler in Reihe geschlossen. Abb. 74 stellt eine viel gebrauchte Schaltung dar; Spannungsmesser V, Leistungsmesser L, Zähler Z und Strommesser A sind gleichzeitig an **einen** Spannungswandler und **einen** Stromwandler angeschlossen.

Die Phys.-Techn. Reichsanstalt prüft Strom- und Spannungswandler und gibt die Abweichungen des Übersetzungsverhältnisses und der Phase in Abhängigkeit von sekundären Belastungen an.

Ein vereinfachter Strommesser für rohe Messungen ist der Anleger von **Dietze** (252) (**Hartmann & Braun**), ETZ 1902, S. 843; 1911, S. 35; 1916, S. 235.

Literatur: Lloyd u. **Agnew**, **Agnew** u. **Fisch**, Bull. of the Bur. of Stand, Bd. 6, S. 273, 281, 1909; Bd. 7, S. 422; Bd. 10, S. 419. — **Sharp** u. **Crawford**, Proc. of the Amer. Inst. of Electr. Eng., Bd. 29, S. 1207, 1910; Proc. of Am. Inst. El. Eng. 28, S. 1004, 1909. — **Orlich**, Helios, Bd. 1912, S. 225. — **Keinath**, Diss. München 1909.

— Möllinger u. Gewecke, ETZ 1911, S. 922 u. 1912, S. 270. ETZ 1915 S. 253. — Alberti und Vieweg, Arch. f. El. 2, S. 209. — Schering u. Alberti, Arch. f. E. 2, S. 263. — Wirz, ETZ 1915 S. 450, 467, 532; Arch. f. El. 6, S. 23. — Schering, Arch. f. El. 7 S. 47. — H. & Br., Ztschr. f. Instrk. 1913, S. 368; ETZ 1914, S. 854; 1915, S. 272.

(209) Kompensationsmethode. Vgl. (180). Wechselspannungen können auch kompensiert werden; und zwar muß dies sowohl der Amplitude wie der Phase nach geschehen. Dafür sind zwei Methoden angegeben:

α) Frankesche Maschine (ETZ 1891, S. 447 und 1913, S. 433. Drysdale, Phil. Mag. Bd. 17, S. 402, 1909). Die Maschine besitzt zwei gleiche, eisenfreie Anker; der Feldmagnet dreht sich. Der eine Anker kann meßbar aus dem Felde gezogen und damit die Amplitude seiner EMK geändert, der andere in der Phase gegen den ersteren verschoben werden; außerdem kann man Teile der Ankerwicklung aus- und einschalten. Mit dem einen Anker (I) schickt man Strom in den zu untersuchenden Stromkreis ABDE (Abb. 75), der andere (II) wird an diejenigen Punkte *AB* gelegt, deren Spannung zu messen ist; ein eingeschaltetes Telephon dient dazu, die Einstellung zu finden, indem man in I die Amplitude, in II die Phase des Stromes ändert.

β) Komplexer Kompensator (Larsen, ETZ 1891, S. 1039. Drysdale, Electr. Bd. 75, S. 157. Déguisne, Arch. f. El. Bd. 5, S. 303). Um die unbekannte Spannung *V* (Abb. 76) zu messen, schließt man eine gleichperiodige bekannte Spannung *E* durch einen Widerstand *AB* und die feste Phase *BB′* eines Variators für gegenseitige Induktion. Durch den Abzweig *CD* am Widerstand *AB* wird die Amplitude, durch Drehen der beweglichen Spule des Variators die Phase der unbekannten Spannung kompensiert. Es wird auf Verschwinden des Tones im Telephon eingestellt.

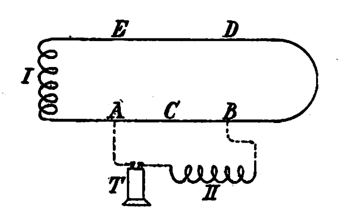


Abb. 75. Kompensation bei Wechselstrom.

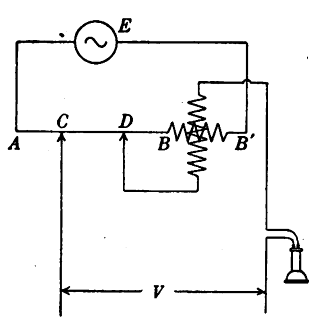


Abb. 76. Komplexer Kompensator.

(210) Messung der Phasenverschiebung. Um die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom zu messen, hat man im allgemeinen Spannung *E*, Strom *I* und Leistung *N* zu messen; dann ist definitionsgemäß (105) $\cos\varphi = N/EI$.

Der Phasenmesser von Dolivo-Dobrowolsky (ETZ 1894, S. 350) gibt bei konstanter Spannung Ausschläge, die proportional $I \sin\varphi$ sind; d. h. proportional dem Blindstrom; der Apparat zeigt also nicht direkt die Phasenverschiebung an.

Der Phasenmesser von Bruger (Phys. Zeitschr. Bd. 4, S. 881, 1903; ETZ 1913, S. 998 u. 1915, S. 595, Verfertiger H. & Br.) besteht aus einer Hauptstromspule, in deren Felde sich eine Spannungsspule in Spitzen drehbar befindet. Letztere besteht aus vier halbkreisförmigen Spulen, die mit der geraden Seite an der Achse so befestigt sind, daß ihre Ebenen um je 90° gegeneinander versetzt sind. Der Spannungskreis besteht aus zwei parallel geschalteten Zweigen, von denen der eine aus zwei um 90° versetzten Teilspulen und einem induktionslosen Widerstand besteht (hintereinander geschaltet), der andere aus den beiden anderen Teilspulen und einem hohen induktiven Widerstand (ebenfalls hintereinander

geschaltet). Das bewegliche System besitzt keine Richtkräfte wie Federn oder dgl., hat also im unbelasteten Zustand keine eindeutige Ruhelage. Bei Belastung erfährt es eine feste Einstellung, die lediglich vom Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung abhängt, dagegen von der Größe von Strom und Spannung unabhängig ist. Über andere Phasenmesser s. Tuma, Zeitschr. Elektrotechn. Wien 1898, S. 14, 235, Martienssen, ebenda, S. 93, 108, 117. — Weston Ges. ETZ 1912, S. 1147; 1914, S. 450. — Keinath, ETZ 1915, S. 28. — Gruhn, ETZ 1913, S. 998.

(211) Frequenz. Die Frequenz findet man am direktesten aus der Drehzahl der erzeugenden Wechselstrommaschine. Ist die Maschine nicht zugänglich, so kann man die Umläufe eines kleinen synchronen Hilfsmotors zählen. Die Drehzahl kann durch geeignete Tachometer gemessen werden.

Sehr verbreitet sind die auf dem Resonanzprinzip beruhenden Apparate (Hartmann & Braun), ETZ 1901, S. 9 und 1904, S. 44, Vibrationstachometer nach Frahm, Siemens & Halske s. auch (232). Eine Reihe von Stahlzungen sind auf verschiedene Töne abgestimmt, deren Schwingungszahlen um eine konstante Zahl fortschreiten. Ein vom Wechselstrom erregter Elektromagnet steht dem Zungenkamm gegenüber und bringt die Zunge gleicher Schwingungszahl zum Schwingen.

Martienssen benutzt folgende Anordnung: Eine Maschinenspannung wird durch eine eisengeschlossene kleine Drosselspule und einen dahinter geschalteten Kondensator geschlossen; dann ist bei richtiger Wahl der Abmessungen die Klemmenspannung der Drosselspule innerhalb eines gewissen Bereiches nahezu unabhängig von der Maschinenspannung, dagegen steigt sie in demselben Spannungsbereich proportional mit der Frequenz. Ein Spannungsmesser an der Drosselspule kann somit nach Frequenzen geeicht werden. Der Apparat hat den Vorzug auch als Registrierapparat gebraucht werden zu können. (Siemens & Halske, ETZ 1910, S. 204. Keinath, ETZ 1916, S. 271).

Eine Stromverzweigung nach Art der Wheatstoneschen Brücke benutzt die Westongesellschaft ETZ 1912, S. 1149 und Gruhn, ETZ 1914, S. 39. Zusammenfassender Bericht über Frequenzmesser s. Zschr. f. Feinmechanik Bd. 23, S. 67, 86, 94, 101, 111, 118.

Prüfung von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessern.

(212) α) Gleichstrom. Für die Spannungsmesser und Spannungskreise der Leistungsmesser braucht man eine vielzellige Akkumulatoren-Batterie von kleiner Kapazität. Durch einen geeigneten Vorschaltwiderstand (Ruhstrat) stellt man den Zeiger des Apparates genau auf den Teilstrich ein, den man zu prüfen wünscht, und mißt die zugehörige Spannung mit dem Kompensator (181, 182). Strommesser und Hauptstromspulen von Leistungsmessern schaltet man mit einem passenden Normalwiderstand in Reihe, an dessen Potentialklemmen man mittels Kompensators den Spannungsabfall und damit den Strom mißt.

Man prüft zweckmäßig zuerst eine Reihe von Punkten bei wachsendem Ausschlag, läßt den Apparat eine Stunde lang mit maximaler Last eingeschaltet, wiederholt danach die erste Reihe in umgekehrter Reihenfolge und beobachtet die Nullage des unbelasteten Apparates. Hierdurch zeigt sich der Einfluß von elastischen Nachwirkungen der Federn und von der Stromwärme. Man muß den Einfluß des Erdfeldes bzw. fremder magnetischer Felder (Zuleitungen) beachten.

(213) β) Wechselstrom. Als Stromquelle ist am meisten eine Drehstromdoppelmaschine (P-T-Reichsanstalt, Zeitschr. Instrk. Bd. 22, S. 124, 1902; Stern, ETZ 1902, S. 774; Hans Boas, ETZ 1912, S. 853) zu empfehlen. Die eine der Drehstrommaschinen ist normal gebaut, die andere dagegen hat einen mit Zahnstange und Trieb drehbaren Ständer. Bei der Prüfung von Leistungsmessern speist die eine Maschine den Spannungskreis, die andere den Hauptstromkreis des

Leistungsmessers. Die gewünschten Spannungen und Ströme werden durch Zwischenschalten geeigneter Transformatoren erzeugt; die Regulierung erfolgt am bequemsten durch die Erregungen der Maschinen. Die Phasenverschiebung wird durch Verstellen des beweglichen Ständers auf den gewünschten Wert gebracht. Für Spannungs- und Leistungsmesser sind elektrometrische Methoden (204, 205), für Strommesser Prüfung durch Thermogalvanometer mit Nebenschlüssen (Schering 206) zu empfehlen. Hingang, Dauereinschaltung, Rückgang wie unter (212).

Aufnahme von Stromkurven und deren Analyse.

Die Aufnahme einer periodischen Stromkurve kann experimentell entweder in der Weise erfolgen, daß man zunächst aus einer Reihe von Perioden nur eine einzelne Phase herausgreift, den Augenblickswert des Stromes in dieser Phase mißt und dann zu anderen Phasen übergeht, bis die Kurve punktförmig aufgenommen ist, oder es wird der ganze Verlauf der Kurve innerhalb einer jeden Periode aufgenommen.

(214) A. Punktförmige Aufnahme nach Joubert. Auf die Achse der Maschine, welcher der aufzunehmende Wechselstrom entnommen wird, ist eine Scheibe aus isolierendem Material aufgesetzt, in deren Rand an einer Stelle des Umfanges ein wenige mm breiter Metallstreifen eingesetzt ist. Eine feststehende Bürste, die auf dem Rande schleift, macht dadurch jedesmal in derselben Phase Kontakt mit dem Metallstreifen. Werden Streifen und Bürste mit der aufzunehmenden Spannung und einem Kondensator verbunden, so erfährt der Kondensator eine dem betreffenden Augenblickswert der Spannung proportionale Ladung, die man durch Entladen durch ein ballistisches Galvanometer messen kann. Setzt man die Bürste auf einen mit der Maschine konzentrischen Teilkreis, so kann man durch langsames Drehen dieses Kreises die Augenblickswerte für jede einzelne Phase messen. Ist die Maschinenachse nicht zugänglich, so wird der Kontaktmacher auf die Achse eines von derselben Wechselstromquelle getriebenen Synchronmotors gesetzt.

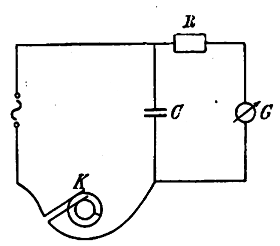


Abb. 77. Kurvenaufnahme mit Kontaktmacher.

Die aufzunehmende Wechselspannung wird durch den Kontaktmacher K, durch ein Galvanometer G und einen Widerstand R geschlossen. Parallel zu Widerstand und Galvanometer ist ein Kondensator C geschaltet (Abb. 77). Während des Kontaktes lädt sich der Kondensator, um sich gleich darauf durch das Galvanometer zu entladen; die periodischen Stromstöße verursachen im Galvanometer einen dem Augenblickswert der Spannung proportionalen konstanten Ausschlag. Bei der Aufnahme von niedrigen Spannungen (z. B. Spannungsabfall an einem Normalwiderstand) wird die Methode leicht unzuverlässig.

Nach dieser Methode sind vollständige Kurvenapparate konstruiert von R. Franke (ETZ Bd. 20, S. 802, 1899 und Zeitschr. Instrk. Bd. 21, S. 11, 1901, Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes und von Hospitalier (Zeitschr. Instrk. Bd. 12, S. 166, 1902).

(215) B. Kontinuierliche Aufnahme. 1. Braunsche Röhre. Eine Vakuumröhre erhält an einem Ende eine Erweiterung, in der ein fluoreszierender Schirm angebracht wird. Die Kathodenstrahlen erzeugen auf letzterem einen hellen Fleck, der Schwingungen ausführt, wenn eine von dem zu untersuchenden Wechselstrom durchflossene Spule neben der Röhre angebracht wird; die Kraftlinien der Spule sollen den Weg der Kathodenstrahlen kreuzen. Die Bewegungen des Flecks kann man im rotierenden Spiegel betrachten. Strom- und Spannungsspule gleichzeitig liefern Lissajoussche Figuren, aus denen man die Phasendifferenz

bestimmen kann. (Wied. Ann. Bd. 60, S. 552.) Betr. photographischer Darstellung vgl. Zenneck (Wied. Ann. Bd. 69, S. 838, 1899) und Wehnelt und Donath (Wied. Ann. Bd. 69, S. 861, 1899).

2. Glimmlichtoszillograph (Gehrcke, Zeitschr. Instrk. Bd. 25, S. 33, 278, 1905). Eine Entladungsröhre wird mit Stickstoff von 7—8 mm Druck gefüllt. Die Elektroden bestehen aus zwei schmalen etwa 10 cm langen Nickelblechen, die in derselben Ebene in der Achse der Röhre liegen. Geht ein Strom durch die Röhre, so überzieht sich die Kathode mit einer Lichthaut, und zwar ist die Länge der Lichthaut, vom freien Ende des Bleches an gemessen, proportional der Stromstärke, die durch die Röhre fließt. Die Einstellung der Lichthaut folgt momentan; betrachtet man also in einem rotierenden Spiegel die Röhre, die von einem Wechselstrom durchflossen wird, so erblickt man seine Kurvenform. Die Röhre wird in der drahtlosen Telegraphie vielfach zur Messung der Frequenz gebraucht.

3. Oszillographen sind Galvanometer mit außerordentlich kleinen beweglichen Systemen. Ist die Eigenfrequenz dieser Systeme sehr groß gegen die Frequenz des aufzunehmenden Wechselstromes, so ist der Ausschlag des Galvanometers in jedem Augenblick proportional dem jedesmaligen Augenblickswert des Wechselstromes. Literatur s. Zeitschr. Instrk. Bd. 21, S. 239, 1901; Bd. 23, S. 63, 1903.

a) Nadeloszillographen. Zwischen den messerförmigen Polen eines starken Magnetes oder Elektromagnetes befindet sich das bewegliche System in Form eines schmalen dünnen Eisenbandes, das entweder in Spitzen gelagert ist oder zwischen zwei Backen ausgespannt ist. Das Eisenband, das durch den Magnet eine Quermagnetisierung erfährt, erhält durch zwei vom Wechselstrom durchflossene Spulen, die dicht an das Eisenband herangeschoben werden, eine drehende Ablenkung. Mittels eines winzigen Spiegels (1 mm^2) werden die Schwingungen des beweglichen Systems sichtbar gemacht. Ein Nachteil dieser Oszillographen besteht darin, daß durch die ablenkenden Spulen eine Selbstinduktivität in den Stromkreis eingefügt wird, der Vorzug in der einfachen Behandlungsweise gegenüber den unter b) genannten. Die Eigenschwingungen des beweglichen Systems können nach Blondels Angabe bis auf 40000 in der Sekunde gesteigert werden (Blondel).

b) Bifilare Oszillographen. Zwischen den Polen eines kräftigen Magnetes oder Elektromagnetes ist ein schmales Kupferband hin- und hergezogen, so daß die beiden Teile der Schleife parallel und dicht nebeneinander liegen. Durch das Band wird der aufzunehmende Wechselstrom geschickt; der Apparat ist also ein Spulengalvanometer mit nur einer Windung. Durch ein Spiegelchen (0,5 mm^2), das quer über beide Bänder geklebt ist, werden die Schwingungen der Bänder sichtbar gemacht. Über einen bifilaren Oszillographen für Hochspannungsmessungen s. Ramsay, Electrician, Bd. 57, S. 884, 1909.

Über Oszillographen mit bedeutend größeren Systemen s. Abraham, Zeitschr. Instrk. Bd. 18, S. 30, 1898, ETZ 1901, S. 207. Über einen Projektionsapparat nach diesem Prinzip s. Journ. de phys., Bd. 8, S. 265, 1909.

Über die Aufnahme von Hochfrequenzströmen s. Arch. f. El. Bd. 5, S. 314 und Bd. 6, S. 161.

(216) Analyse von Wechselstromkurven. Vgl. (107). Eine Wechselstromkurve, welche unterhalb der Abszissenachse ebenso verläuft, wie oberhalb derselben, im übrigen aber eine beliebige Form hat, kann mathematisch durch eine Fouriersche Reihe dargestellt werden in der Form: $A_1 \sin \omega t + A_3 \sin 3\,\omega t + A_5 \sin 5\,\omega t + \cdots + B_1 \cos \omega t + B_3 \cos 3\,\omega t + B_5 \cos 5\,\omega t + \cdots$ oder $I_1 \sin (\omega t + \alpha_1) + I_3 \sin (3\,\omega t + \alpha_3) + I_5 \sin (5\,\omega t + \alpha_5) + \cdots$ wobei die Amplituden mit geradzahligem Index gleich Null gesetzt sind (106).

Um die Fouriersche Reihe für einen Wechselstrom zu bestimmen, kann man entweder die nach (214, 215) aufgenommenen Kurven auf mathematischem Wege analysieren, oder man kann die Koeffizienten der Reihe direkt experimentell messen.

Für die mathematische Analyse kommen in der Praxis folgende Methoden in Frage.

a) Die Methode von Fischer-Hinnen (ETZ 1901, S. 396). Enthält die Reihe nur die ungeradzahligen Oberschwingungen, so grenzt man auf der Abszissenachse eine einer vollen Periode entsprechende Länge l ab, teilt diese nacheinander in $n=3, 5, 7, 9, \ldots$ Teile und entnimmt die zugehörigen Ordinaten der Wechselstromkurve. Dann wird für jedes n der Mittelwert e_n der Ordinaten (Vorzeichen berücksichtigen) gebildet. Danach wird eine zweite Reihe von n Mittelwerten in derselben Weise genommen, nachdem der Anfang der Periode um den Betrag $l/4\,n$ verschoben worden ist; die so entstehenden Mittelwerte werden mit e_n' bezeichnet. Dann ist:

$$I_n = \sqrt{e_n^2 + e_n'^2} \qquad \sin\alpha_n = \frac{e_n}{\sqrt{e_n + e_n'^2}} \quad \text{für } n = 7, 9, 11, 13, 15$$

und

$$I_3 \sin\alpha_3 = e_3 - e_9 - e_{15} \qquad I_5 \sin\alpha_5 = e_5 - e_{15},$$
$$I_3 \cos\alpha_3 = e_3' + e_9' - e_{15}' \qquad I_5 \cos\alpha_5 = e_5' + e_{15}'.$$
$$I_1 \sin\alpha_1 = e_1 - e_3 - e_5 - e_7 - e_{11} - e_{13} + e_{15},$$
$$I_1 \cos\alpha_1 = e_1' - e_3' - e_5' - e_7' - 2e_9' - e_{11}' - e_{13}' - e_{15}'.$$

Man kann diese Methode dahin vervollständigen, daß man l in $n=6, 10, 14\ldots$ Teile teilt, das Vorzeichen der zu den früheren neu hinzutretenden Ordinaten umkehrt, und im übrigen genau so rechnet, wie vorher (s. Encycl. der math. Wissensch. Teubner 1904. Bd. II, 1, S. 652 und S. Thompson, Proc. Phys. Soc. 23, S. 334, 1911). Ferner: Beattie, Electrician, Bd. 67, S. 326, 370, 847, 1911.

c) Methode von Runge. Man teilt eine halbe Welle in 12 gleiche Teile und errichtet in den 11 Teilpunkten die Ordinaten, deren Längen mit $a_1\, a_2 \ldots a_{11}$ bezeichnet werden mögen. Dann bildet man:

$$m_1 = \frac{1}{2}(a_1 + a_{11}) \qquad m_2 = \frac{1}{2}(a_2 + a_{10}) \cdots m_6 = a_6,$$
$$n_1 = \frac{1}{2}(a_5 - a_7) \qquad n_2 = \frac{1}{2}(a_4 - a_8) \cdots n_6 = 0.$$

Daraus findet man:

$$A_1 = 0{,}0863\, m_1 + 0{,}1667\, m_2 + 0{,}2358\, m_3 + 0{,}2887\, m_4 + 0{,}3220\, m_5 + 0{,}1667\, m_6,$$
$$A_3 = 0{,}2358\, m_1 + 0{,}3333\, m_2 + 0{,}2358\, m_3 - 0{,}2357\, m_5 - 0{,}1667\, m_6,$$
$$A_6 = 0{,}3220\, m_1 + 0{,}1667\, m_2 - 0{,}2357\, m_3 - 0{,}2886\, m_4 + 0{,}0863\, m_5 + 0{,}1667\, m_6,$$
$$A_7 = 0{,}3220\, m_1 - 0{,}1667\, m_2 - 0{,}2357\, m_3 + 0{,}2886\, m_4 + 0{,}0863\, m_5 - 0{,}1667\, m_6,$$
$$A_9 = 0{,}2358\, m_1 - 0{,}3333\, m_2 + 0{,}2357\, m_3 - 0{,}2358\, m_5 + 0{,}1667\, m_6,$$
$$A_{11} = 0{,}0863\, m_1 - 0{,}1667\, m_2 + 0{,}2358\, m_3 - 0{,}2887\, m_4 + 0{,}3220\, m_5 - 0{,}1667\, m_6.$$

Setzt man in diese Formeln an Stelle der m die entsprechenden n, so erhält man $B_1, -B_3, B_5, -B_7, B_9, -B_{11}$.

Dieselbe Methode kann zur Berechnung von je 36 Koeffizienten angewandt werden (vgl. Loppé (Ecl. él. Bd. 16, S. 525), Runge, Zeitschr. f. Math. u. Phys. 1902, S. 443, Prentiss, Phys. Rev. Bd. 15, S. 257, 1902). Weitere Methoden ähnlicher Art bei Schleiermacher (ETZ 1910, S. 1246). Pichelmayer u. Schrutka, ETZ Bd. 33, S. 129, 1912.

b) Harmonische Analysatoren sind Apparate, welche — beruhend auf der Formel für die Koeffizienten einer Fourierschen Reihe — die Analyse der Kurven mechanisch (nach Art der Planimeter) ausführen; dahin gehören die Apparate von Lord Kelvin (Proc. Roy. Soc., London, Bd. 24, S. 266, 1876), Coradi (vgl. Henrici, Phil. Mag., Bd. 38, S. 110, 1894) Michelson und Stratton

(Amer. Journ. of Science Bd. 5, S. 1, 1898; Zeitschr. Instrk. 1898, S. 93). Mader (ETZ Bd. 30, S. 847, 1909).

c) Über die Resonanzmethode s. Pupin (Amer. Journ. of Sc. 1894, S. 379, 473), Armagnat (Journ, de phys. (4) Bd. 1, S. 345, 1902), Roth (Arch. f. El. Bd. 6, S. 359, 388.)

Literatur: Orlich, Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. Braunschweig 1906 — Hausrath, Helios 1912. — Galle, Die mathematischen Instrumente, Teubner.

Magnetische Messungen.

(217) Bestimmung eines magnetischen Momentes mit dem Magnetometer. Der zu untersuchende Magnet wird in dem großen Abstande r von einer Bussole mit Kreisteilung oder Spiegelablesung in der ersten oder zweiten Hauptlage (S. 28) aufgestellt und die Ablenkung der Bussole beobachtet, wenn man den Magnet um 180° dreht; die Hälfte dieses Winkels sei $= \varphi$. Hierbei wirkt auf die Nadel in erster Hauptlage einmal das vom Magnet mit dem Moment $\mathfrak{M}$ ausgeübte Drehmoment $2\,\mathfrak{M}\mathfrak{M}'\cos\varphi/r^3$ (28), andererseits das Drehmoment der senkrecht zur Nadel gerichteten Komponente der Horizontalstärke $\mathfrak{h}$ des Erdmagnetismus $\mathfrak{M}'\mathfrak{h}\sin\varphi$. Da die Nadel unter der Wirkung beider Drehmomente in Ruhe bleibt, müssen diese gleich sein, und es folgt daraus für die erste Hauptlage $\mathfrak{M} = {}^1/_2 \cdot r^3\mathfrak{h}\operatorname{tg}\varphi$, für die zweite entsprechend $r^3\mathfrak{h}\operatorname{tg}\varphi$. Sollen die Formeln auf 1 % genau sein, so muß der Abstand r sechsmal so groß sein wie die Länge des Magnetes; ist r nur dreimal so groß wie diese Länge, so beträgt der Fehler etwa 4 %. Genauere Formeln s. Kohlrausch, Praktische Physik, oder Gumlich, Leitfaden der magnet. Messungen.

Bei langen Stäben kann man eine andere Methode verwenden. Im Abstand r von der Bussole wird der Stab von der Länge l senkrecht aufgestellt, und zwar der eine Pol in der Höhe der Nadel, der andere entfernt von der letzteren; man verschiebt den Magnet in der Achsenrichtung, bis der Ausschlag φ ein Maximum wird. Dann ist $\mathfrak{M} = 5/6 \cdot lr^2\mathfrak{h}\operatorname{tg}\varphi$. Soll die Formel auf 1 % genau sein, so darf der Abstand r nicht mehr als $^1/_5$ der Magnetlänge betragen; ist $r = {}^1/_3$ der Magnetlänge, so beträgt der Fehler etwa 5 %.

Bei der Untersuchung von Eisenstäben in stromdurchflossener Spule hat man die Wirkung der Magnetisierungsspule zu berücksichtigen; dies geschieht am besten durch Ausgleichung, indem man eine vom magnetisierenden Strome durchflossene Hilfsspule der Bussole so gegenüberstellt, daß sie die Wirkung der Magnetisierungsspule ohne Eisenstab genau aufhebt.

Die Stärke der Magnetisierung $\mathfrak{J}$ wird gefunden, indem man das nach dem Vorigen bestimmte Moment des Stabes bzw. eines Ellipsoids durch 5/6 des Volumens bzw. durch das ganze Volumen dividiert.

Die zugehörige Feldstärke $\mathfrak{H}$ ergibt sich nach (32) aus $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - NI$. Man kann somit nach dem magnetometrischen Verfahren auch absolute Magnetisierungskurven bestimmen, genau jedoch nur mit Rotationsellipsoiden, bei denen die Magnetisierung im Innern gleichmäßig und N (vgl. Tab. S. 34) konstant ist, was bei kürzeren Stäben nicht der Fall ist. Bei diesen gilt die Formel für $\mathfrak{H}$ genau nur dann, wenn I Null ist, d. h. bei der Koerzitivkraft. Diese für die Charakterisierung des Materials so wichtige Größe läßt sich also mit dem Magnetometer auch an Stäben von beliebiger Gestalt genau und rasch folgendermaßen ermitteln:

Bestimmung der Koerzitivkraft mit dem Magnetometer: Man magnetisiert den Probestab in der Spule reichlich hoch (bei weichem Material bis zu $\mathfrak{H} = 150$, bei hartem bis zu $\mathfrak{H} = 300$), läßt den Strom auf Null abnehmen, kommutiert ihn und läßt ihn so lange wieder anwachsen, bis der Ausschlag der scheinbaren Remanenz verschwunden ist, das Magnetometer also wieder auf Null steht. Aus der hierzu nötigen Stromstärke I A und der Spulenkonstante K ergibt sich der Wert der Koerzitivkraft zu $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' = 0{,}4\pi K I$ (29).

Bestimmung der Horizontalstärke $\mathfrak{h}$. Nur bei ungenaueren Messungen kann man $\mathfrak{h}$ einer Tafel (Deutsche Seewarte) entnehmen, bei genaueren muß man es bestimmen, am besten und einfachsten mit Hilfe eines elektrischen Stromkreises von großem Radius ϱ mit einer oder wenigen (m) Windungen, etwa einer Tangentenbussole. Dieser wird so aufgestellt, daß seine Ebene in den magnetischen Meridian fällt und das in seinem Mittelpunkt errichtete Lot die Mitte des Magnetometermagnets trifft. Ein Strom von I A erzeugt dort ein Feld $F_1 \perp \mathfrak{h}$, das die Ablenkung φ_1 hervorbringen möge; dann gilt $F_1 = \mathfrak{h} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$; hieraus folgt $\mathfrak{h}$; dabei ist $F_1 = \frac{0{,}2\varrho^2 \pi m \cdot I}{\sqrt{(r^2 + \varrho^2)^3}}$.

Astasiertes Magnetometer. Bei der Messung kurzer Stäbe mit kleinem magnetischen Moment muß man, da man den Stab der Magnetometernadel nicht beliebig nähern darf, zur Erzielung hinreichend großer Ausschläge φ die erdmagnetische Richtkraft $\mathfrak{h}$ schwächen, entweder mittels geeignet angebrachter Hilfsmagnete oder besser mittels einer ringförmigen stromdurchflossenen Spule, deren Ebene in den magnetischen Meridian gestellt wird und die die Magnetometernadel aufnimmt. Hiermit läßt sich durch bloße Regulierung des Stroms jede beliebige Empfindlichkeit (nötigenfalls auch geringere!) herstellen (Gumlich, Leitfaden).

Störungsfreies Torsionsmagnetometer. Je größer die Empfindlichkeit, desto größer auch die Störungen durch Erdströme, Stromschleifen, elektrische Bahnen usw.; diese vermeidet das störungsfreie Torsionsmagnetometer von Kohlrausch und Holborn. Hier ist die Magnetnadel ersetzt durch ein System von zwei genau gleich starken, durch eine leichte Stange von etwa 2 m Länge verbundene Magnetstäbchen, die entgegengesetzt gerichtet sind, so daß die Erdrichtkraft überhaupt nicht wirkt; sie wird ersetzt durch die Torsionskraft des dünnen Aufhängedrahtes aus Platiniridium, mit dem das gegen Luftströmungen geschützte System an der Zimmerdecke befestigt ist. Aus dem beobachteten Ablenkungswinkel φ erhält man das Moment $\mathfrak{M}$ mittels der Formel $\mathfrak{M} = C \cdot {}^1/_2 \cdot r^3 \varphi\,(1 + {}^1/_2\,\varphi^2 + \cdots)$. Hierin bedeutet C eine Konstante, die von der Torsionskraft des Fadens abhängt und in ähnlicher Weise mittels eines stromdurchflossenen Hilfskreises zu ermitteln ist, wie beim gewöhnlichen Magnetometer. Da der Probekörper nicht nur auf den unteren, sondern in geringem Maße auch auf den oberen Magnet wirkt, so ist eine von der Beschaffenheit des Instruments und dem Abstand des Probekörpers abhängige Korrektion anzubringen. Die Ruhelage ist um so besser, je weiter die Störungsquelle, deren Stärke eine geringere Rolle spielt, vom Instrument entfernt ist (Kohlrausch und Holborn, Ann. d. Phys. R. 4, Bd. 10, S. 287; 1903; Gumlich, Leitfaden).

(218) Messung einer Kraftlinienmenge mit dem Schwingungsgalvanometer. Eine bequeme und verbreitete Methode der magnetischen Untersuchung des Eisens besteht darin, daß man einen Probestab durch den Strom magnetisiert und die erzeugte oder bei Stromunterbrechung verschwindende Kraftlinienmenge mit einer Prüfspule mißt; das Nähere s. (219, 220). Die entstehende oder verschwindende Kraftlinienmenge Φ bringe am Schwingungsgalvanometer den Ausschlag α_1 hervor, dann gilt

$$\Phi = \frac{R_2}{m_2} \cdot g \cdot \frac{t}{\pi} \cdot \alpha_1 \cdot k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\pi}{\delta}},$$

worin R_2 und m_2 Widerstand des ganzen sekundären Kreises und Windungszahl der Prüfspule, t die Dauer der Halbperiode der Nadel, k ihr Dämpfungsverhältnis (127); $\delta = \log \operatorname{nat} k$, g eine Galvanometerkonstante. Um die umständliche Rechnung zu vermeiden, mißt man mit demselben Galvanometer den Induktionsstoß aus einer Normalspule, d. i. einer langen Magnetisierungsspule von K Windungen auf 1 cm und einer genau bekannten Windungsfläche S; diese umgibt

man mit einer kurzen Sekundärspule von m_s Windungen, welche mit dem Galvanometer zu einem Kreis vom Widerstand R_s verbunden ist. Kommutiert man den primären Strom I, so durchfließt das Galvanometer die Elektrizitätsmenge $8\pi K I S m_s/R_s$, welche den Ausschlag α_2 hervorruft; es ist dann

$$\frac{8\pi K I S m_s}{R_s} = g \cdot \frac{t}{\pi} \alpha_2 \cdot k^{\frac{1}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{\pi}{\delta}}$$

und hieraus (184)

$$\Phi = \frac{R_2}{R_s} \cdot \frac{m_s}{m_2} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot 8\pi K S \cdot I = C \cdot I \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Hierbei ist darauf zu achten, daß in beiden Fällen der Schließungswiderstand des Galvanometers der gleiche ist, da sich sonst das Dämpfungsverhältnis ändert.

Die Normalspulen sind sehr sorgfältig herzustellen und auszumessen; sie können von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeicht werden. Man beachte, daß in all diesen Formeln die elektrischen Größen im absoluten (CGS) Maße einzusetzen sind.

(219) Messung der Feldstärke $\mathfrak{H}$. Mit der Prüfspule, nach dem Vorigen. Die als sekundäre Spule benutzte Drahtrolle wird in dem zu messenden Felde aufgestellt, so daß ihre Windungsebene zur Richtung des Feldes senkrecht steht. Das Feld wird nun plötzlich erzeugt, aufgehoben oder um 180° gedreht; oder die Prüfspule wird rasch aus dem Felde gezogen oder darin um 180° gedreht. Man erhält wie in (218) Φ, die Gesamtmenge der durch die Spule gehenden Kraftlinien, welche man noch durch den Spulenquerschnitt S zu dividieren hat, um $\mathfrak{H}$ zu erhalten.

Mit dem magnetischen Spannungsmesser. Der kleine Apparat, der auf dem Satz beruht, daß das Linienintegral der magnetischen Feldstärke Null oder $4\pi m I$ ist, je nachdem der Integrationsweg keine oder $m I$ AW umschließt, besteht aus einer mit dem Schwingungsgalvanometer verbundenen biegsamen Spule mit zahlreichen Windungen und gleichmäßigem Querschnitt. Die Spule wird entweder aus dem zu messenden Feld herausgezogen oder das Feld kommutiert. Der Galvanometerausschlag entspricht entweder direkt dem zu messenden Feld, falls der Spannungsmesser keine Magnetisierungswindungen umschließt, oder, wenn dies der Fall ist, der Differenz zwischen dem scheinbaren, durch die Zahl der AW gegebenen und dem wahren Feld, also der sogenannten Scherung. Der leicht zu eichende Apparat kann auch da Verwendung finden, wo andere Methoden versagen, z. B. bei der Messung eines Teiles des magnetischen Kreises einer Dynamomaschine (Rogowski und Steinhaus, Arch. f. Elektr. Bd. 1, S. 141).

Mit der Wismutspirale. Ein gepreßter und zur flachen Spirale gewundener Wismutdraht wird, mit der Windungsebene senkrecht zur Richtung der Kraftlinien, in das Feld gebracht. Der Draht ändert im Felde seinen Widerstand; diese Änderung muß für jede Spirale besonders ermittelt werden.

Eisenuntersuchung.

(220) Hystereseschleife. A. Am Probestab nach der Jochmethode. 1. Mit dem Schwingungsgalvanometer. Von der zu untersuchenden Eisensorte wird ein Probestab in genau zylindrischer Form (oder ein Dynamoblech-Bündel) vom Querschnitt q und der Länge l hergestellt; er wird in seinem mittleren Teil möglichst dicht umschlossen von der Prüfspule (Windungszahl m_2) und umgeben mit der Magnetisierungsspule (Windungszahl m_1, Länge l_1), die so zu bemessen ist, daß ein Strom, der $\mathfrak{H} = 0{,}4\pi m_1 I_1/l_1$ zu 300 macht, noch keine starke Erwärmung hervorruft. Der Probestab wird in ein Schlußstück (Joch) aus schwedischem Eisen, bestem Schmiedeeisen oder Dynamo-Stahlguß eingesetzt, welches seine beiden Enden magnetisch möglichst gut verbindet (Klemmbacken oder besser noch Kugelkontakte); die Form des Joches ist nicht wesentlich; sein Quer-

schnitt soll groß, die Länge des Kraftlinienweges klein sein; der Querschnitt (oder die Summe der parallel geschalteten Querschnitte) q' möglichst größer als $200\,q$. Die Magnetisierungsspule wird mit einer Sammelbatterie, Regulierwiderständen, Strommesser und Stromwender zu einem Stromkreis verbunden, die Prüfspule mit dem Schwingungsgalvanometer nach (218). Man beginnt mit einem Strom, der $\mathfrak{H}$ etwa zu 150 für Eisen, 300 für Stahl macht, und mißt die Kraftlinienmengen, welche induziert werden, wenn man den magnetisierenden Strom um geeignete Beträge (ohne Stromunterbrechung) plötzlich ändert. Ist der Strom Null geworden, so wechselt man seine Richtung und läßt ihn zu dem vorigen höchsten Betrag wieder ansteigen, dann wieder zu Null abnehmen, wechselt die Richtung und läßt ihn wieder bis zum höchsten Betrag wachsen. Für jeden Schritt in der Widerstandsänderung erhält man einen Ausschlag, der der Änderung der Kraftlinienmenge $\Delta\Phi$ proportional ist; es ist jedoch darauf zu achten, daß die einzelnen Sprünge nur klein sein dürfen, da durch große Sprünge die Form der Magnetisierungskurve nicht unbeträchtlich beeinflußt werden kann. Von der gefundenen Kraftlinienmenge muß man genau genommen diejenige Menge abziehen, die auf den Raum zwischen der Prüfspule und dem Eisen entfällt; umschlingt die Prüfspule den Querschnitt q_1, und ist der Querschnitt des Eisens q, so ist abzuziehen $(q_1 - q)\,\Delta\mathfrak{H}$; bei mäßigen Feldstärken kann jedoch, wenn die Prüfspule den Stab eng umschließt, diese Korrektion meist vernachlässigt werden. Summiert man alle (berichtigten) $\Delta\Phi$ zwischen zwei entgegengesetzt gleichen höchsten Stromwerten, so ist die Hälfte davon die höchste erzielte Kraftlinienmenge. Aus der Stromstärke I erhält man $\mathfrak{H} = 0{,}4\pi K I$ (29), aus der Kraftlinienmenge Φ die Induktion $\mathfrak{B} = \Phi/q$. Die Beobachtungen liefern je einen Zuwachs (Abnahme) von $\mathfrak{B}$ für eine Vergrößerung (Verkleinerung) von $\mathfrak{H}$ und sind demgemäß aufzutragen. Man erhält eine Kurve wie in Abb. 19, S. 30. Diese Kurve ist nun allerdings noch keine absolute Magnetisierungskurve, wie sie ein gleichmäßig bewickelter, geschlossener Ring oder ein Ellipsoid liefern würde, da beim Joch in den Weg der Induktionslinien noch Widerstände durch die Jochteile selbst, hauptsächlich aber durch die Luftschlitze eingeschaltet sind, deren Überwindung eine gewisse magnetomotorische Kraft erfordert. Die mit dem Joch erhaltene Kurve hat daher eine zu gestreckte Gestalt und muß mit Hilfe einer Scherung auf die absolute Kurve reduziert werden.

Zur Bestimmung dieser Scherungswerte dreht man einen im Joch untersuchten Stab zum Ellipsoid ab und untersucht dieses mit dem Magnetometer (217). Die Differenzen zwischen entsprechenden Werten der so gewonnenen absoluten Kurve und der Jochkurve geben die Verbesserungen für die beim Joch beobachteten Werte der Feldstärke; man trägt sie am besten graphisch als sogenannte Scherungskurve auf. Ist man nicht in der Lage, magnetometrische Beobachtungen mit dem Ellipsoid durchzuführen, so untersucht man einen Stab im Joch, dessen absolute Kurve bekannt ist, und verfährt entsprechend; die Reichsanstalt liefert oder untersucht derartige Stäbe.

Da die Scherung in hohem Maße von der Natur des zu untersuchenden Materials abhängt, so kann man nicht dieselbe Scherungskurve für weiches Eisen (Stahlguß, Schmiedeeisen, Dynamoblech), Gußeisen, weichen und harten Stahl verwenden; man bedarf vielmehr für jede dieser Arten mindestens einer besonderen Scherungskurve. Bei genaueren Messungen empfiehlt es sich, für jeden Stab die wahre Koerzitivkraft noch gesondert mit dem Magnetometer zu bestimmen (217). Kennt man sie, so kennt man auch die Jochscherung für den Punkt der Koerzitivkraft genau und kann die Scherungskurve in geeigneter Weise durch diesen Punkt hindurchlegen (Gumlich und Schmidt, ETZ 22, S. 695, 1901). Derartige Scherungskurven sind für jeden auf dem Jochprinzip beruhenden Apparat notwendig.

2. Mit dem doppelten Schlußjoch (Ewing): Um den Einfluß des Jochwiderstandes zu verringern, kann man zwei lange, dünne, mit Primär- und Sekundärspule versehene Stäbe aus gleichem Material verwenden, welche möglichst dicht nebeneinander gelagert und durch zwei kurze und dicke Jochstücke verbunden

werden (vgl. auch 3 und 4). Der Widerstand der Luftschlitze zwischen Stab und Joch wird gering, wenn die konisch zugespitzten Stäbe in eine konische Bohrung der Joche passen und mit einer Schraube festgezogen werden. (Kapp, ETZ 1908, S. 833).

3. In der magnetischen Brücke (Holden, El. World Bd. 24, S. 617; Ewing, Electrician Bd. 37, S. 41, 115). Zwei zu vergleichende Stäbe, ein Normalstab und ein gleich dicker Stab aus dem zu untersuchenden Eisen, werden durch zwei kräftige Joche zu einem magnetischen Kreis verbunden; jeder Stab ist mit einer Magnetisierungsspule umgeben. Auf den beiden Jochen steht die magnetische Brücke, ein eiserner Bogen, der in der Mitte durchschnitten ist; in diesem Schlitz schwingt eine Magnetnadel, deren Nullage durch einen Richtmagnet senkrecht zur Richtung der Brücke gelegt wird. Werden die magnetisierenden Kräfte durch Änderung des Stromes in der einen Spule so abgeglichen, daß durch die Brücke keine Kraftlinien gehen, so sind die Kraftlinienmengen in beiden Stäben gleich; bei gleichem Querschnitt sind dann die Permeabilitäten je umgekehrt proportional den magnetisierenden Kräften. — Um den hierzu erforderlichen Normalstab zu untersuchen, benutzt man nur die Joche des Apparates, nachdem man die Brücke entfernt hat. Zwei gleiche Stäbe werden eingespannt, einmal mit der freien Länge 4π cm mit Spulen von 100 Windungen und das zweite Mal mit der freien Länge 2π cm und mit Spulen von 50 Windungen. In jedem Falle wird mit dem Schwingungsgalvanometer die $\mathfrak{B}$-$\mathfrak{H}$-Kurve bestimmt; ist das zu einem gewissen $\mathfrak{B}$ gehörige $\mathfrak{H}$ für den ersten Fall $\mathfrak{H}_1$, für den zweiten $\mathfrak{H}_2$, so ist die wegen des Joches und der Stoßstellen berichtigte magnetische Kraft $2\mathfrak{H}_1 - \mathfrak{H}_2$ für $\mathfrak{B}$. Man erhält so die berichtigte $\mathfrak{B}$-$\mathfrak{H}$-Kurve für die beiden Normalstäbe.

4. Mit dem kompensierten Doppeljoch von Burrows (Circ. Bureau of Standards Nr. 17; 1916). Die Anordnung entspricht der von 3. Es wird versucht, durch zusätzliche Magnetisierungswindungen, welche um das Joch und um die Enden beider Probestäbe gelegt sind und einen besonderen Stromkreis bilden, die zusätzlichen Widerstände von Jochteilen und Luftspalten zu überwinden; in diesem Falle bedarf man keiner Scherung für die Feldstärke $\mathfrak{H} = 0{,}4\,\pi K I$. Ist der Zweck erreicht, dann tritt keine Streuung ein, der Induktionsfluß ist also über die ganze Länge der Stäbe konstant. Man erkennt dies mit Hilfe mehrerer, in der Mitte und in bestimmten Abständen davon angebrachter Prüfspulen, welche beide Stäbe umschließen und entweder direkt mit dem Schwingungsgalvanometer verbunden oder gegeneinander geschaltet werden, je nachdem es sich darum handelt, zwei Stäbe aus dem gleichen Material absolut zu untersuchen oder die Eigenschaften des Probestabs mit den bekannten des Normalstabs zu vergleichen.

Die Methode gibt unzweifelhaft genauere Werte, als die gewöhnliche Jochmethode mit der etwas willkürlichen Scherung, ist aber sehr verwickelt und zeitraubend (drei unabhängige Magnetisierungsstromkreise und mehrere Sekundärkreise!).

5. Mit dem Permeameter von Picou (Bull. Soc. Intern. d. El. 1902, S. 745) und von Illiovici (Bull. Soc. Intern. d. El. 1913, S. 581): Der Apparat soll ebenfalls Werte geben, welche keiner Scherung bedürfen. Er besteht aus zwei Jochen, welche an zwei entgegengesetzten Flächen des zu untersuchenden Vierkantstabes angesetzt werden. Beide Joche sind mit einer Spule A und B, der Stab ist mit einer Spule C umgeben. Schaltet man zunächst A und B hintereinander, während C stromlos bleibt, so durchsetzt der Kraftlinienfluß nur die beiden Joche, die vier Luftschlitze zwischen dem Stab und den Jochen sowie die doppelte Stabdicke. Dreht man dann die Stromrichtung in der Spule B um und schickt nun auch durch C einen Strom von solcher Stärke, daß der vorher beobachtete Kraftlinienfluß in den beiden Jochen ungeändert bleibt, dann liefert der durch C gehende Strom gerade diejenige Feldstärke, welche der in dem Probestab herrschenden Induktion entspricht, da die beiden Ströme in A und B die zur Über-

windung des magnetischen Widerstandes in den Jochen und Luftschlitzen notwendige magnetomotorische Kraft liefern. Der Apparat kann natürlich auch zur Untersuchung von Blechstreifen verwendet werden.

Das Universalpermeameter von Illiovici kann als eine Kombination des Permeameters von Picou mit der magnetischen Brücke von Holden (220,3) aufgefaßt werden. Alle drei Apparate dürften kaum strengen Anforderungen an Genauigkeit genügen und haben sich auch, als zu verwickelt, in der deutschen Technik nicht eingebürgert.

6. Mit der Drehspule (Koepsel). Der mit der Magnetisierungsspule umgebene Probestab (Dynamoblech-Bündel) ist durch ein einfaches Joch geschlossen; dies Joch wird an einer Stelle durch einen Luftzwischenraum in Gestalt einer zylindrischen Bohrung unterbrochen, deren Achse senkrecht zu den Kraftlinien steht, und die durch Eisen bis auf einen Zwischenraum von 1 mm wieder ausgefüllt ist; der ausfüllende Kern ist umgeben von einer Spule nach Art der im Drehspulengalvanometer verwendeten, deren Ebene durch Spiralfedern parallel zu den Kraftlinien gestellt wird. Durch die Drehspule schickt man einen konstanten, vom Querschnitt des Probestabes abhängigen Strom. Die am Zeiger abzulesende Ablenkung ist diesem Strom und der Feldstärke im Luftzwischenraum proportional und gibt demnach bei bestimmtem Querschnitt sogleich die Induktion 𝔅 im Eisen. Um die Wirkung der Magnetisierungsspule auf das Joch aufzuheben, trägt letzteres einige Windungen, die zu der Magnetisierungsspule in Reihe und mit entgegengesetzter Wirkung geschaltet sind. Bei der Aufstellung des Apparates ist der Erdmagnetismus zu beachten; auch sonst sind stärkere äußere magnetische Einflüsse (z. B. von Strom- und Spannungsmessern) fernzuhalten. Der Apparat wird von Siemens & Halske gebaut und ist bei einer für technische Zwecke meist hinreichenden Genauigkeit (Scherung notwendig!) sehr bequem.

7. Durch die Zugkraft (du Boissche Wage). Der mit der Magnetisierungsspule umgebene wagrecht gestellte Probestab wird durch ein einfaches halbkreisförmiges Joch geschlossen, das durch einen wagrechten Schnitt nahe beim Probestab zwei gleichgroße Trennungsflächen erhält. Der obere Teil ist auf einer seitwärts von der Mittelebene des Joches angebrachten Schneide gelagert, so daß die beiderseits gleichen Zugkräfte in den Trennungsflächen ungleiche Drehmomente ausüben; der Unterschied wird durch verschiebbare Laufgewichte gemessen. Man erhält aus der Wägung den Wert von 𝔍 oder von 𝔅. Die Scherungslinien werden mit einem beigegebenen Probestab bestimmt; nach deren Ermittelung darf die Stellschraube, welche die Bewegung des beweglichen Jochteils begrenzt, nicht mehr verstellt werden. Der Erdmagnetismus ist zu beachten oder durch einen Hilfsmagnet zu kompensieren. (Zeitschr. f. Instrk. 1900, S. 113 u. 129.)

Eine gute Wage gibt recht genaue Resultate, ist aber gegen Erschütterungen sehr empfindlich; sie eignet sich daher mehr für wissenschaftliche als für technische Messungen. Nach Einschieben von zwei Eisenplatten in die Luftschlitze des Jochs und Einführung einer den Stab umschließenden Prüfspule ist die Wage ohne weiteres auch für ballistische Messungen zu verwenden.

B. Untersuchung an größeren Blöcken, Permeameter von Drysdale. Aus dem zu untersuchenden Block wird mit einem Hohlbohrer ein Loch ausgebohrt, in dessen Mitte ein kleiner zylindrischer Zapfen stehen bleibt, der als Probeobjekt dient. In den Hohlraum der Bohrung wird ein Stöpsel eingeführt, der eine Magnetisierungs- und eine Prüfspule enthält. Den Rest der Öffnung verschließt ein Eisenkern, der zwischen Zapfen und umgebender Eisenmasse einen magnetischen Schluß herstellt. (Bull. Soc. Intern. d. El. 1902, S. 729.)

C. Untersuchung am fertigen Stück. Denso (Inaug.-Dissert.) untersucht fertige Gußstücke, z. B. das Eisengerüst einer Dynamomaschine. An einer Stelle, wo keine Streuung stattfindet, wird eine Spule, die senkrecht zum Eisen schmal ist, dicht an das Eisen angelegt und hier 𝔥 bestimmt (stetiger Über-

gang der Tangentialkomponente des magnetischen Feldes!), darauf mit umgelegter Prüfspule 𝔅 im Eisen; die der Remanenz entsprechende Induktion muß besonders bestimmt werden, z. B. bei einer Dynamomaschine aus der Ankerspannung bei stromlosen Schenkeln. Die Windungsfläche der schmalen Spule ergibt sich durch Vergleich mit einer ausmeßbaren Spule im gleichmäßigen Feld.

D. Magnetisierbarkeit größerer Proben von Eisenblech in Epsteinscher Anordnung (S. 163) für 25 bis 300 AW.

1. Meth. Epstein: Messung der mittleren Induktion durch Sekundärspulen über die ganzen Bündel, der AW/cm durch mI/l (l = mittlere Eisenlänge 200 cm) (ETZ 1911, S. 334). Luftschlitze und Streuung verursachen Fehler, die etwas geringer werden, wenn man für l statt der Eisenlänge die Spulenlänge setzt (Sumec, ETZ 1915, S. 145).

2. Meth. Gumlich-Rogowski: Messung von Induktion und Feldstärke in der (streuungsfreien) Mitte der Bündel durch Induktions- und Feldstärkenspulen; letztere sind, wie bei Denso (C) parallel zur Blechoberfläche angeordnet. (ETZ 1912, S. 262; Gumlich, Leitfaden.)

3. Meth. van Lonkhuyzen (S. & H., Wernerwerk): Vergleichung der Proben mit Normalbündeln, deren Eichung die P. T. R. nach 2 ausführt. Die Messung ist sehr bequem. (ETZ 1911, S. 1131.)

(221) Messungen bei sehr kleinen Feldstärken („Anfangspermeabilität"). Hauptbedingung ist außerordentlich gute Entmagnetisierung der Probe (226). Jochmethoden sind hier nicht anwendbar, da der remanente, schwer zu beseitigende Magnetismus des Jochs starke Fehler verursachen kann. Messungen entweder mit dem Magnetometer oder ballistisch an bewickeltem Ring oder Ellipsoid (gestrecktem Stab) mit Probespule von hoher Windungszahl in offener Magnetisierungsspule. Stabmessungen sind auf solche am Ellipsoid mit bestimmtem Dimensionsverhältnis zu beziehen. (Gumlich und Rogowski, ETZ 1911, S. 613.)

(222) Messungen bei hoher Feldstärke. (Sättigungswert.) 1. Nach der verbesserten Ewingschen Isthmusmethode (Gumlich, ETZ 1909, S. 1065). Zwei Polstücke eines kräftigen Elektromagnets sind konisch abgedreht und durch eine Messingfassung verbunden (Abb. 78). Das zu untersuchende Stäbchen von etwa 30 mm Länge und 3 mm Durchmesser wird beiderseits in die einige mm tiefe Bohrung an der Spitze der Kegel eingeschoben. Es ist umgeben von einer doppelten, mit dem Schwingungsgalvanometer verbundenen Prüfspule, deren innere das Stäbchen eng umschließt, während zwischen der inneren und äußeren Spule ein etwa 1 mm breiter Zwischenraum bleibt. Das ganze Probestück läßt sich um eine zwischen den Polen des Elektromagnets angebrachte Achse um 180° drehen. Hierbei entspricht der Galvanometer-Ausschlag, den die innere Spule allein gibt, der Induktion im Stäbchen, der Ausschlag bei Gegeneinanderschaltung beider Spulen der zugehörigen Feldstärke. Die Windungszahl beider Spulen müssen gleich, die Windungsflächen genau bekannt sein; die zwischen Spule und Stäbchen verlaufenden Kraftlinien sind zu berücksichtigen. Auch aus Dynamoblech lassen sich derartige Stäbchen herstellen.

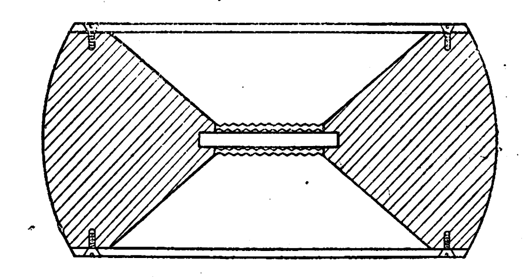


Abb. 78. Isthmusmethode nach Ewing.

2. Nach der Joch-Isthmus-Methode (Gumlich, Arch. f. El. Bd. 2, S. 465, 1914 und Leitfaden). Zu den Messungen dient der zylindrische Probestab der gewöhnlichen Jochmessungen; er wird in einen ins Joch passenden Einsatz eingeführt, der aus zwei Hohlzylindern aus weichem Eisen von etwa der halben Jochlänge, 25 mm äußerem und 6 mm innerem Durchmesser besteht. Beide Eisenzylinder sind durch einen etwa 12 mm breiten Zwischenraum getrennt, in welchem vier konzentrisch angeordnete, durch kleine Zwischenräume voneinander getrennte Meßspulen liegen, von denen, wie bei 1., die innerste Spule bei der Kommutierung des Stroms in der Jochspule die Induktion im Stab mißt, während bei Gegeneinanderschaltung der Spulen 1/2; 2/3; 3/4 der Galvanometerausschlag dem in den Zwischenräumen der betreffenden Spulen vorhandenen Kraftlinienfluß, also der dort herrschenden Feldstärke entspricht, die sich ziemlich stark ändert. Trägt man die gewonnenen Werte graphisch auf, so findet man durch Extrapolation auch die an der Oberfläche des Stabes herrschende, also die gesuchte, Feldstärke mit ziemlicher Genauigkeit. Für gewöhnliche Messungen kann man sich mit der Bestimmung der Feldstärke durch die Spulen 1/3 und einer mittels genauer Vergleichsversuche gewonnenen Korrektion (Scherung) begnügen. Die Anordnung in der Reichsanstalt liefert Feldstärken von 7—8000 Gauß; sie läßt sich auch auf kürzere Stäbe mit Ansatzstücken, auf Ellipsoide und bei Verwendung eines anderen Einsatzes auch auf Dynamoblech anwenden. Weiches Material (Schmiedeeisen, Stahlguß usw.) ist etwa von $\mathfrak{H} = 2000$ ab gesättigt, hartes (Stahl usw.) erst bei noch höheren Feldstärken. Die Reichsanstalt bestimmt Sättigungswerte [vgl. auch (32)] von festem Material und Dynamoblech.

(223) Nullkurve, jungfräuliche Kurve. Wenn man den Probestab zunächst entmagnetisiert (226) und ihn dann in einem Untersuchungsapparat der von Null aus ohne Unterbrechung bis zum Maximum ansteigenden Magnetisierung unterwirft, so erhält man eine Kurve, wie sie in Abb. 19 strichpunktiert angegeben ist.

(224) Kommutierungskurve. Man beginnt mit dem unmagnetischen Zustand (226); der magnetisierende Strom wird auf einen bestimmten Wert eingestellt, mehrmals kommutiert und schließlich der Ausschlag des Schwingungsgalvanometers bei der Kommutierung abgelesen (218); auf diese Weise geht man bis zum Maximum des Stromes; der Ausschlag entspricht dem doppelten Wert der Induktion. Die Kommutierungskurve liegt im allgemeinen etwas über der Nullkurve.

(225) Untersuchung von Dynamoblech mit Wechselstrom. Aus dem zu untersuchenden unterteilten Eisen stellt man einen geschlossenen magnetischen Kreis her. Mittels einer Spule vom Widerstande R_1 und eines Wechselstromes von der Stärke I und Frequenz f (in 1 s) wird dieser Eisenkreis magnetisiert. Ein an die Enden der Spule angelegter Spannungsmesser dient zur Bestimmung der Induktion (S. 163). Von der Leistung N, welche ein eingeschaltetes Wattmeter angibt, zieht man den Energieverbrauch durch den Strom in der Magnetisierungsspule $I^2 R_1$ sowie den Verbrauch im Spannungsmesser E^2/R_2 und in der Spannungsspule des Wattmeters E^2/R_3 ab, dann ist der Verlust im Eisen vom Volumen V:

$$N_e = N - (I^2 R_1 + E^2/R_2 + E^2/R_3) = f V (\eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} + f \cdot \xi \cdot \mathfrak{B}^2)\, 10^{-7}.$$

Hierin entspricht das erste Glied rechter Hand dem Hysterese-Verlust, das zweite dem Verlust durch die im Eisen entstehenden Wirbelströme. Dividiert man die Gleichung durch f, so erhält man rechter Hand eine lineare Funktion von f; man kann also durch zwei oder mehr Messungen bei derselben Induktion, aber möglichst verschiedener Periodenzahl den Hysteresekoeffizienten η und den Wirbelstromkoeffizienten ξ einzeln ermitteln.

Zur Vermeidung des Korrektionsgliedes $I^2 R$ in N_e empfiehlt sich bei höheren Stromstärken die Verwendung einer besonderen Spannungsspule.

Der gesamte Energieverbrauch bei der Ummagnetisierung von 1 kg Eisenblech bei 50 Perioden, $\mathfrak{B} = 10\,000$ bzw. 15 000 und einer Temperatur von 20° heißt Verlustziffer [V_{10} bzw. V_{15}].

Empfehlenswerte Versuchsanordnungen sind angegeben von:

1. Epstein (Lahmeyer A.-G.): Vier Magnetisierungsspulen von 42 cm Länge, in quadratischer Anordnung auf einem Brett befestigt, nehmen je 2,5 kg Eisenblech in Gestalt von 50 cm langen und 3 cm breiten Streifen auf; die aus den Spulen herausragenden Enden der Blechbündel werden durch Klammern fest gegeneinander gepreßt. Die einzelnen Blechstreifen müssen wegen der Wirbelströme durch Papier oder dergl. gegeneinander isoliert sein. Bequeme Anordnung nach van Lonkhuyzen (ETZ 1912, 531).

2. Möllinger (Schuckertwerke). Die Probestücke werden in Gestalt von geschlossenen Ringen, deren Breite klein ist im Verhältnis zum Durchmesser, ausgestanzt, mit Papierzwischenlagen übereinander geschichtet und festgepreßt. Die Magnetisierungsspule wird gebildet durch 100 Windungen aus dickem, biegsamem Kabel, von denen jede mittels eines Steckkontaktes geöffnet bzw. geschlossen werden kann.

3. Richter (Siemens & Halske). Eine aus Holzleisten bestehende zylinderförmige Trommel von 1 m Höhe und 2 m Umfang trägt außen die Magnetisierungswindungen aus starkem Kupferdraht, in welche vier ganze Blechtafeln von 100 × 200 cm Größe eingeschoben werden können. Die durch Papiermanschetten isolierten Enden der Tafeln werden abwechselnd übereinander gelegt und durch eine Leiste festgedrückt. Der Apparat gestattet Messungen ohne Materialverlust, ist aber nur für Tafeln bestimmter Maße zu verwenden.

4. Lloyd (in England und Amerika viel verwendet). Die Anordnung unterscheidet sich von der Epsteinschen im wesentlichen durch geringere Länge der Probebündel (25 cm) sowie durch Einführung rechtwinklig gebogener Eckstücke aus ähnlichem Material, welche zwischen die Fugen der einzelnen Bleche eingesetzt werden, um den Übergangswiderstand der Luftschlitze zu verringern; ihr Einfluß muß bei der Messung berücksichtigt werden.

Bei diesen Messungen hängt die Spannung E mit der Induktion $\mathfrak{B}$ zusammen durch die Formel: $E = \mathfrak{B} \cdot q \cdot m \cdot 4f \cdot \alpha \cdot 10^{-8}$. Hierin bedeutet q den Querschnitt der Blechprobe, m die Windungszahl der Magnetisierungsspule, f die Frequenz und α den sogenannten Formfaktor, d. h. das Verhältnis der effektiven zur mittleren Spannung. α soll $= 1{,}11$ sein (sinusförmige Spannungskurve); hat der Formfaktor einen anderen Wert, so ist der aus den Beobachtungen berechnete Koeffizient ξ noch mit $(1{,}11/\alpha)^2$ zu multiplizieren; dementsprechend ist auch der Wert der Verlustziffer zu reduzieren. Mit wachsender Temperatur nimmt der Wirbelstromverlust ab, und zwar bei den gewöhnlichen Blechsorten für 1 Grad ungefähr um 0,5 %. Die oft recht beträchtliche Erwärmung macht sich bei der Berechnung von η und ξ dadurch geltend, daß die Werte von N_e/ν scheinbar nicht genau auf einer geraden Linie, sondern auf einer nach unten konkaven Kurve liegen; die Abweichung verschwindet bei Berücksichtigung der Temperatur (Messung am sichersten mit dem Thermoelement). Neuerdings ist es gelungen, magnetisch vorzügliche Eisensorten mit hohem Leitungswiderstand und entsprechend geringem Wirbelstromverlust herzustellen [sog. legiertes Blech (32)]. Mit wachsendem Siliziumgehalt sinkt auch der Temperaturkoeffizient des Widerstands entsprechend folgender Tabelle und damit die Korrektion des Wirbelstromverlustes wegen der Temperatur; bei höheren Legierungen ist sie ganz zu vernachlässigen (Gumlich, Wiss. Abh. der P. T. R. IV, H. 3, und Leitfaden).

Si %	0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Temperaturkoeffizient %	0,57	0,33	0,24	0,15	0,11	0,08	0,06

Methoden zur Untersuchung der Hysterese: Searle Electrician Bd. 36, S. 800) umwickelt die ringförmige Eisenprobe vom Quer-

schnitt q mit zwei Spulen; die primäre hat K Windungen auf 1 cm Länge und wird von einem Strom I durchflossen, der auch durch die feststehende Spule eines Dynamometers geht; die sekundäre Spule hat m Windungen und ist mit der beweglichen Spule des Dynamometers, deren Schwingungsdauer t ist, verbunden; der Widerstand dieses sekundären Kreises R ist annähernd induktionsfrei. Läßt man nun den magnetisierenden Strom mit Hilfe eines geeigneten Schalters die Werte von $+ I$ durch 0, $- I$, 0, $+ I$ nicht zu rasch durchlaufen, so erfährt die bewegliche Spule des Dynamometers einen Stoß, der den Ausschlag α hervorbringt. Wenn darauf die konstanten Ströme i_1 und i_2 durch die beiden Spulen des Dynamometers gesandt werden, so bringen sie eine Ablenkung α_0 (Einstellung) hervor. Dann ist die durch Hysterese verbrauchte Energie für diese springende Änderung der Magnetisierung, welche jedoch von dem Verbrauch bei stetiger Änderung nicht unbeträchtlich abweichen kann,

$$\frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{H}\,d\mathfrak{B} = \frac{KR}{mq} \cdot \frac{t}{2\pi} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_0}.$$

Zeigt das Dynamometer Dämpfung, so ist wie bei (218) angegeben zu verfahren.

Schickt man in die primäre Spule einen Wechselstrom von der Stärke I und f Per/s, so ist

$$\frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{H}\,d\mathfrak{B} = \frac{KR}{mq} \cdot f \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_0}.$$

Hier ist α eine Einstellung; Schwingungsdauer des Dynamometers und Einfluß der Dämpfung fallen weg.

In den Apparaten von Ewing (ETZ 1895, S. 292) und von Blondel-Carpentier (ETZ 1898, S. 178) wird eine kleinere Menge des zu untersuchenden Eisenbleches in das Feld eines kräftigen Stahlmagnets gebracht. In Ewings Apparat wird die Eisenprobe, ein längliches Päckchen aus Blechen (1,5 × 8 cm), gedreht, und der Stahlmagnet folgt der Drehung; in dem Blondelschen Apparat wird der Magnet gedreht, und die Eisenprobe folgt. Aus dem Ausschlag kann man die Hysterese berechnen. Jeder Apparat ist nur für eine bestimmte Induktion zu benützen. Die Angaben sind wenig genau und haben nur Vergleichswert.

(226) Entmagnetisieren von Eisenproben. Den angenähert unmagnetischen Zustand erreicht man durch wechselnde Magnetisierungen mit abnehmender Stromstärke; man magnetisiert mit Wechselstrom, den man durch Einschalten von Widerstand allmählich schwächt, oder mit Gleichstrom, den man wendet und gleichzeitig schwächt.

Völlige Entmagnetisierung ist nur durch besondere Vorsichtsmaßregeln, namentlich ganz gleichmäßige Abnahme des Entmagnetisierungsstromes zu erreichen (vgl. ETZ 1911, S. 180).

Literatur: Du Bois, Magnetische Kreise, deren Theorie und Anwendung. Berlin 1894. Jul. Springer. — Ewing, Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, deutsch von Holborn und Lindeck. Berlin 1892. Jul. Springer. — E. Gumlich, Leitfaden der magnetischen Messungen. Braunschweig 1918. Fried. Vieweg u. Sohn. — Erich Schmidt, Die magnetische Untersuchung des Eisens und verwandter Metalle. Halle a. S. 1900. Wilh. Knapp.

Zweiter Abschnitt.

Technische Messungen.

Messungen an elektrischen Maschinen und Transformatoren.

(227) Zu messende Größen. Für den normalen Betrieb werden in der Regel folgende Eigenschaften der Maschinen geprüft:

1. Bestimmung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Belastung.
2. Erwärmung der Maschinen und zwar entsprechend der vorgeschriebenen Belastungsart und Dauer (Dauerlauf, Stundenlauf usw.).
3. Bei Generatoren Spannungsänderung von Leerlauf bis zur Vollast.
4. Bei Motoren Änderung der Drehzahlen in Abhängigkeit von dem wirksamen Drehmoment.

Die Grundsätze für diese Messungen sind vom Verbande Deutscher Elektrotechniker aufgestellt in den Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren (ETZ 1903, S. 684; 1907, S. 826; 1909, S. 788; 1912, S. 464).

Dazu „Erläuterungen" herausgeg. von Dettmar.

Es genügt daher an dieser Stelle die Hilfsmittel und Hilfsapparate zu besprechen, welche die Ausführung der Normalien ermöglichen.

Hilfsapparate und Hilfsmessungen.

(228) Belastungs- und Regulierwiderstände. Belastungswiderstände werden am besten aus Konstantan, Resistin, Kruppin oder ähnlichen Legierungen hergestellt. Von den früher sehr viel angewandten Glühlampenwiderständen ist man mehr und mehr zurückgekommen, hauptsächlich weil ihr Betrieb zu teuer ist (Bruch). Da es meistens auf gute Kühlung ankommt, so benutzt man am besten frei in der Luft ausgespannte Leiter. Die geeignetsten Leiterformen sind: dünne Drähte in Parallelschaltung, Blechband, besonders gewelltes Band (Röhren mit Wasserkühlung v. Brockdorff, Pforzheim). Drähte über 1,6—2 mm Durchmesser sind ungünstig. Drähte von 0,5 mm an windet man zu Spiralen auf; auch Blechstreifen lassen sich als Spiralen verwenden. Widerstände, die eine starke Erwärmung aushalten sollen, bettet man in Emaille oder brennt sie in Glimmer ein. Eine zweckmäßige Anordnung stellen die Asbestgitterwiderstände von Schniewindt dar, bei denen Asbestfäden in einer Richtung mit dem Widerstandsdraht in der Richtung senkrecht dazu verwebt sind (vgl. auch 60).

Die maximale Energieaufnahme kann bedeutend gesteigert werden, wenn man die Widerstände in Petroleum oder einfach in Wasser taucht. Das letztere ist wegen der großen Verdampfungswärme des Wassers besonders wirksam; 1 kW verdampft in der Minute etwa 25 g Wasser.

Als Regulierwiderstände sind sehr geeignet die Widerstände von Gebr. Ruhstrat (Göttingen); es sind unter starkem Zug auf einen Schieferklotz aufgewickelte Drähte, auf denen senkrecht zur Wicklungsebene ein Schiebekontakt gleitet. Zur besseren Kühlung werden sie auf emaillierte Metallrohre gewickelt; Kreuzwicklung zur Vermeidung der Induktion.

Kohlenplatten, die aufeinander gelegt werden, können als Widerstände für starke Ströme benutzt werden; der Widerstand wird durch Druck geändert. Von Nachteil ist die verhältnismäßig geringe ausstrahlende Oberfläche.

Für viele Zwecke sehr brauchbar sind Widerstände aus Eisendraht, die in Glashüllen mit Wasserstoffüllung eingeschlossen sind. Vermöge des großen und veränderlichen Temperaturkoeffizienten sind sie als Selbstregulatoren brauchbar (vgl. Kallmann, ETZ 1906, S. 45, 686, 710; 1907, S. 495, 518).

Regulierbare kleine Widerstände für starke Ströme kann man nach zwei verschiedenen Methoden erhalten; einen sehr kleinen Widerstand bekommt man durch Gegenüberstellen von zwei großplattigen Elektroden mit geringem Abstand; zwischen den Elektroden verschiebt man eine Glasscheibe, ein Holzbrett oder dgl., um den Querschnitt der leitenden Flüssigkeit zu verändern; statt dessen kann man auch die Elektroden heben und senken. Größere Widerstände erhält man in zylinderförmigen hohen Gefäßen, in denen man eine Elektrode an den Boden legt, während man die andere gegen jene in der Höhe verschiebt. Als Flüssigkeit dient Sodalösung, die Elektroden bestehen aus Eisen. — Diese Art der Flüssigkeitsrheostaten ist nicht für dauernde Einschaltung zu empfehlen.

Weiteres über technische Widerstände siehe bei K. Fischer, Helios 1909, Heft 25, 26, 27. Vogel, ETZ 1911, S. 1266.

Sehr große Widerstände (mehr als 100000 Ω) erhält man, wenn man einen Graphitstrich auf eine Glas- oder Porzellanplatte bringt. Besser ist eine Röhre, die mit einer 10proz. Jodkadmiumlösung in Amylalkohol (Hittorf) gefüllt ist. Es ist zweckmäßig, die Elektroden verschiebbar zu machen. Über Widerstände aus Mannit-Borsäurelösung Arch. f. El. Bd. 1, S. 423.

(229) Widerstandsmessungen. Am besten werden Widerstandsmessungen an Maschinenwicklungen durch Messung von Strom und Spannung (171) ausgeführt.

Bei Messungen in der Brücke ist darauf zu achten, daß die Widerstände meist stark induktiv sind; der Galvanometerkreis muß daher bei Schaltungsänderung in den stromführenden Kreisen unbedingt geöffnet bleiben.

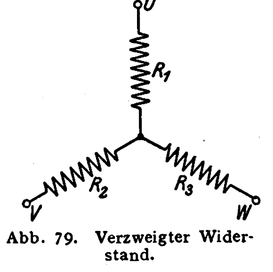


Abb. 79. Verzweigter Widerstand.

Bei genauer Messung des Widerstandes eines Gleichstromankers werden die Bürsten abgehoben, der Strom ist dann bei unerregter Maschine zwei Kommutatorlamellen zuzuführen, die je nach Wicklungsart und Wicklungsschritt zu wählen sind. Die Berechnung der Lamellen erfolgt am leichtesten nach einer von Wettler aufgestellten Tabelle (ETZ 1902, S. 8).

Sollen die Widerstände $R_1 R_2 R_3$ von drei in Stern geschalteten Zweigen gefunden werden, so mißt man die Widerstände, $r' r'' r'''$ zwischen den Klemmen VW, WU und UV; dann ist:

$$R_1 = (r'' + r''' - r')/2, \qquad R_2 = (r''' + r' - r'')/2, \qquad R_3 = (r' + r'' - r''')/2.$$

Zur Bestimmung des Kontaktwiderstandes zwischen Bürste und Schleiffläche verfährt man folgendermaßen: 1. man mißt den Widerstand zwischen zwei Bürsten, während die übrigen abgehoben sind und die Ankerlamellen durch herumgelegte Kupferdrähte kurzgeschlossen sind, 2. man mißt bei rotierendem Anker, 3. man mißt bei dem normalen Belastungsstrom (ETZ 1900, S. 429).

Neuere Untersuchungen über die Messung des Übergangswiderstandes an Kohlenbürsten s. Hayashi, Arch. f. El. Bd. 2, S. 70. — Czepek, Arch. f. El. Bd. 5, S. 161. Lum. él. Bd. 21, S. 324, 1913.

(230) Isolationswiderstände werden heutzutage an Maschinen in der Regel nicht mehr gemessen. Wohl aber sind Spannungsproben im betriebswarmen Zustande vorgeschrieben. Die Probe erfolgt mit Wechselspannung; man pflegt dazu

kleine fahrbare Transformatoren zu verwenden. Es werden sämtliche stromleitenden Teile der Maschine untereinander verbunden und die Transformatorpole zwischen diese Leiter und den Körper der Maschine gelegt.

Ferner werden Prüftransformatoren zur Prüfung von Wicklungen angewandt. Kommt eine schadhafte Spule in den Magnetkreis des Prüftransformators, so steigt die primäre Stromstärke derselben an (364).

(231) Magnetische Messungen. Magnetische Spannungen zwischen zwei Punkten können experimentell mit dem magnetischen Spannungsmesser ermittelt werden (219). Flüsse werden am besten dadurch gemessen, daß Hilfswicklungen angebracht werden, welche die Flächen umschließen, die von den zu untersuchenden Flüssen durchsetzt werden. Bei statischer Magnetisierung wird die Hilfswicklung mit einem ballistischen Galvanometer untersucht, bei periodischer Magnetisierung mit einem Spannungsmesser oder einem Oszillographen.

Messung der Streuung (218). Man legt die Hilfswicklung einmal um denjenigen Eisenquerschnitt, der vom maximalen Magnetfluß durchsetzt wird (Schenkel) und andererseits denjenigen, von dem festgestellt werden soll, um wieviel der Fluß in dem betreffenden Querschnitt kleiner geworden ist. Anstatt die ballistischen Ausschläge nacheinander zu messen, kann durch geeignetes Gegeneinanderschalten eine Nullmethode angewandt werden ETZ 1902, S. 314.

Feldverteilung längs des Ankerumfanges. Die Messung kann bei ruhender Maschine mit einer Wismutspirale ausgeführt werden. Besser ist es bei Gleichstromankern zwei Hilfsbürsten anzuwenden, die auf zwei aufeinanderfolgenden Kollektorsegmenten aufliegen; die an den Bürsten gemessene Spannung ist der magnetischen Induktion an der betreffenden Stelle des Magnetgestelles proportional. Durch allmähliches gemeinsames Verschieben der beiden Bürsten erhält man die Kurve der magnetischen Verteilung.

(232) Drehgeschwindigkeit. Die Umlaufzahl wird mit einem einfachen Zählwerk, dem Umlaufzähler, Tourenzähler, ermittelt, indem man das Zählwerk eine gemessene Zeit mitlaufen läßt. Wird der Motor durch das Einsetzen des Tourenzählers merklich belastet, so ist es besser, auf die Achse einen kleinen Mitnehmer zu setzen.

Die Zeit wird am einfachsten durch eine Stoppuhr gemessen. Da die Zeitpunkte des Einsetzens und Loslassens des Zählwerks nicht genau mit Beginn und Ende der Zeitmessung übereinstimmen werden, so entspricht die am Umdrehungszähler abgelesene Zahl nicht genau dem gemessenen Zeitintervall. Man muß damit rechnen, daß der Zeitpunkt des Einsetzens sowohl, wie des Loslassens je bis zu 0,2 Sekunden falsch getroffen wird. Man macht also bei der Messung des Zeitintervalls Fehler bis zu 0,4 Sekunden. An dieser Tatsache darf man sich nicht dadurch beirren lassen, daß Stoppuhren häufig eine bedeutend größere Ablesegenauigkeit zulassen; der Meßfehler (max 0,4 s) wird dadurch nicht beeinflußt. Läßt man also den Umlaufzähler 1 min lang mitlaufen, so beträgt der Fehler des Resultates bis zu 0,7 %.

Mays Umlaufzähler-Chronograph zählt gleichzeitig Sekunden und Umläufe. Er besteht aus einem Uhrwerk mit Sekundenzeiger und einem Zählwerk; beide werden gleichzeitig in und außer Tätigkeit gesetzt, wenn man die Körnerspitze an die Welle der zu untersuchenden Maschine andrückt.

Das Tachometer dient zur eigentlichen Geschwindigkeitsmessung; es besteht im wesentlichen aus einem mit der Maschinenachse gekuppelten Zentrifugalpendel, dessen Stellung mittels Zeiger und Skale abgelesen wird; es gibt die augenblickliche Geschwindigkeit der Maschine, ausgedrückt in Umläufen für die Minute, an. Es wird entweder durch einen Riemen oder besser durch einen Mitnehmer mit der Maschinenachse gekuppelt. Die Skale wird mit dem Umlaufzähler geeicht. — Durch Verbindung eines Tachometers mit einer geeigneten Schreibevorrichtung sowie mit einer Uhr (156) erhält man einen Registrierapparat (Tachograph).

Das Gyrometer von Braun besteht aus einer vertikal gestellten Glasröhre, die fast vollständig mit Glyzerin gefüllt ist. Wird das Gyrometer mit der Maschinenachse gekuppelt, so bildet die Glyzerinoberfläche ein Paraboloid, dessen tiefster Punkt ein Maß für die Drehzahl ist. Auf der Röhre wird eine empirisch gefundene Skale angebracht.

Elektrische Umlaufzähler. Der Anker einer kleinen Gleichstrommaschine, deren Feld gewöhnlich durch einen Dauermagnet gebildet wird, wird mit der Welle gekuppelt, deren Drehzahl ermittelt werden soll. Letztere wird durch einen geeigneten Gleichspannungsmesser gemessen. Man kann auch eine kleine Wechselstrommaschine verwenden; man mißt dann die Periodenzahl des von ihr erzeugten Wechselstroms, z. B. mit dem Frequenzmesser von Hartmann & Braun (211).

Das Vibrations-Tachometer nach Frahm (Siemens & Halske) besteht aus einer Reihe abgestimmter Stahlfedern, die auf einem gemeinsamen Steg nebeneinander aufgeschraubt sind. Wird dieser Kamm an der laufenden Maschine befestigt, so wird er im Takte der Umlaufzahl erschüttert. Dadurch gerät diejenige Zunge, welche mit der Drehzahl der Maschine in Resonanz ist, in kräftige Schwingungen.

Bei kleinen Maschinen und Motoren würde man durch Anlegen eines Zählapparates den Gang zu sehr beeinflussen. Benischke (ETZ 1899, S. 143) verwendet in diesem Fall einen zweiten Motor, dessen Geschwindigkeit reguliert werden kann; auf die Achse dieses Motors setzt er eine Scheibe mit sektorförmigen Ausschnitten und auf die Achse des zu untersuchenden Motors eine ähnliche Scheibe oder einen mehrstrahligen Stern. Beide Motoren werden in Drehung versetzt und die vom zu untersuchenden Motor gedrehte Scheibe durch die Ausschnitte der anderen angesehen. Man reguliert die Geschwindigkeit des Hilfsmotors so lange, bis die erstere Scheibe (oder Stern) still zu stehen scheint. Sind beide Scheiben gleich geteilt, so stimmen die Umdrehungsgeschwindigkeiten genau überein; bei verschiedener Teilung kann man das Verhältnis leicht bestimmen; enthält die Scheibe des zu untersuchenden Motors m Speichen, Schlitze oder Strahlen, die des Hilfsmotors p Speichen, so ist die Geschwindigkeit des Hilfsmotors, welche besonders gemessen wird, mit p/m zu multiplizieren. Über die Messung sehr großer Drehzahlen nach der stroboskopischen Methode s. Schillo, ETZ 1912, S. 159.

Ungleichförmigkeitsgrad. Schwankt die Winkelgeschwindigkeit einer Welle während einer Umdrehung, so ist $(v_{max} - v_{min})/(v_{max} + v_{min})$ der Ungleichförmigkeitsgrad.

a) Messung mit der Stimmgabel. Man läßt eine Stimmgabel auf dem Umfange des ungleichförmig rotierenden Zylinders ihre Schwingungen schreiben und mißt die Länge der einzelnen Schwingungen aus.

b) Vergleich mit einer gleichförmigen Bewegung. Man stellt der ungleichförmig rotierenden Scheibe eine gleichförmig rotierende gegenüber und zeichnet die relative Bewegung beider zueinander auf. (Göpel, Franke, ETZ 1901, S. 887).

c) Bestimmung durch Kurvenaufnahme. Man kuppelt mit der drehenden Welle eine kleine Gleichstrommaschine mit konstanter Erregung und nimmt mittels Kontaktmachers oder Oszillographen (214, 215) die Spannungskurve innerhalb einer Umdrehung auf. (Franke, a. a. O.; Bull. Soc. int. 2, S. 557. Runge, Zsch. Ver. D. I. 59, S. 664, 687.)

(233) Die Schlüpfung, d. i. die Differenz zweier angenähert gleicher Drehzahlen in Prozenten der Gesamtdrehzahl (502), kann direkt durch Messung jeder einzelnen Drehzahl für sich gefunden werden. Verwendet man dabei die gewöhnlichen Umlaufzähler, so wird das Resultat um so ungenauer, je geringer die Schlüpfung ist. Seemann (ETZ 1899, S. 764) hat eine Vorrichtung angegeben, durch welche das Einrücken und Ausrücken der Zählwerke auf elektrischem Wege genau gleichzeitig geschieht. Ziehl (ETZ 1901, S. 1026) mißt auf mechanischem Wege

direkt die Differenz der Drehzahlen und die Drehzahl selbst, indem er zwei Umlaufzähler derart kombiniert, daß die Welle des einen mit dem Gehäuse des anderen fest gekuppelt ist.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Messung der Schlüpfung bei Asynchronmotoren (502); hierfür kommen vorteilhaft stroboskopische Methoden zur Anwendung (Benischke, ETZ 1899, S. 142; Wagner, Glasers Annalen 1904). Man setzt zu diesem Zweck auf die Achse des zu untersuchenden Motors eine Scheibe mit abwechselnd p schwarzen und p weißen Sektoren, wo p gleich der Polzahl des Motors ist, und beleuchtet sie mit einer Bogenlampe, die vom gleichen Wechselstrom gespeist wird. Bei synchronem Lauf scheinen die Sektoren still zu stehen; schlüpft der Motor, so wandern sie; und zwar ist die Schlüpfung gleich $100\, z/pn$. Dabei bedeutet z die Zahl der schwarzen Sektoren, die in einer Minute vorüberwandern, n die minutliche Drehzahl. (ETZ 1911, S. 219.)

Statt der Bogenlampe kann man auch einen kleinen von demselben Wechselstrom angetriebenen Synchronmotor vor den zu untersuchenden Motor setzen und die in (232) beschriebene Methode zur Messung der Drehzahl nunmehr zur Messung der Schlüpfung verwenden (vgl. ETZ 1904, S. 392).

Ähnliche Methoden: H. Schultze (ETZ 1907, S. 557), Hilpert (ETZ 1917, S. 587).

Setzt man auf die Welle des Asynchronmoters einen Joubertschen Kontaktmacher, den man mit einer dahinter geschalteten Glühlampe an die Betriebsspannung anlegt, so wird die Glühlampe abwechselnd aufleuchten und verlöschen. Leuchtet die Lampe y mal während einer Minute auf, so ist die Schlüpfung $= y/2pn$ (p Zahl der Polpaare, n Drehzahl des auf gleiche Polzahl reduzierten Generators) (Seibt, ETZ 1901, S. 194). Über einen auf diesem Prinzip beruhenden Apparat s. Bianchi, ETZ 1903, S. 1046.

Man kann auch den im Anker fließenden Strom zur Schlüpfungsmessung verwenden. Schaltet man zwischen zwei Schleifringe ein Drehspulen-Amperemeter, das zweiseitig für positive und negative Ströme geteilt ist, so pendelt der Zeiger langsam hin und her; macht er in t Sekunden z volle Schwingungen, und ist f die Frequenz des Betriebsstromes, so ist die Schlüpfung gleich z/tf (ETZ 1901, S. 194).

(234) Messung der von einer Maschine aufgenommenen mechanischen Leistung (399). Wird die Maschine durch Riemen angetrieben, so kann man die ihr zugeführte mechanische Leistung mit dem Dynamometer von v. Hefner-Alteneck (ETZ 1881, S. 230) oder mit demjenigen von Fischinger (Herm. Pöge in Chemnitz) messen. Bessere Resultate ergibt bei direkter Kupplung das Torsionsdynamometer. Es besteht grundsätzlich aus einer Stahlstange, durch welche die Antriebsmaschine mit der zu untersuchenden Maschine gekuppelt wird. Der Winkel, um den der Stahlstab verdrillt wird, ist ein Maß für das übertragene Drehmoment; er wird am besten auf optischem Wege gemessen. Die Methode eignet sich für raschlaufende Maschinen mit möglichst geringem Ungleichförmigkeitsgrad.

Literatur: Gramberg, technische Messungen. 1910. — Görges u. Weidig, ETZ. 1913, S. 701. 739. — Brodhun, Zschr. f. Instrk. 1904, S. 313. — Vieweg, Arch. f. El. 2, S. 48. 1913.

In der Mehrzahl der Fälle werden aber diese Apparate nicht gebraucht. Man kuppelt vielmehr die zu untersuchende Maschine direkt mit einem Motor von bekanntem Wirkungsgrad oder braucht eine der indirekten Methoden.

(235) Die von einem Motor erzeugte mechanische Leistung wird mit dem Pronyschen Zaum gemessen, bei welchem die ganze Leistung des Motors durch Reibung verzehrt wird. Die Bremsscheibe s (Abb. 80) wird zwischen zwei Backen eingeklemmt, an denen sich ein langer Hebelarm befindet; die unbelastete Bremse muß auf der Scheibe ausbalanciert sein. Der Hebelarm trägt an seinem äußersten Ende eine Vorrichtung zum Anhängen von Gewichten. Es werden P kg* aufgelegt

und die Schrauben der Bremse so fest angezogen, daß der Hebel zwischen den Anschlägen *a a* frei schwebt. Dann ist (421)

$$N = 0{,}001028\,P d n \text{ Kilowatt}$$

die mechanisch abgegebene Leistung des Motors. Darin bedeutet *d* den Hebelarm in m und *n* die Drehzahl in der Minute.

Während des Bremsversuches muß man die Klemmbacken durch Benetzen mit Wasser (am besten Seifenwasser) schlüpfrig erhalten.

Anstatt Gewichte anzuhängen, kann man auch einen am Hebelarm befestigten senkrechten Stift auf eine Feder- oder Brückenwage drücken lassen.

In vielen Fällen ist es bequem, am Ende des Hebelarmes statt eines Gewichtes eine Spiralfeder anzubringen, deren Ausdehnung und Spannung an einer Skale abgelesen wird und die nach kg* geeicht ist. Eine solche Feder vermag der etwas wechselnden Leistung besser zu folgen als das einmal aufgelegte Gewicht.

Für die Messung kleinerer Leistungen sind die Seilbremsen (Abb. 81) sehr zweckmäßig. Ein Seil wird ein- oder mehrmals um eine wassergekühlte Bremsscheibe geschlungen und am Ende durch ein Gewicht belastet, während in den auflaufenden Teil des Seiles ein Federdynamometer eingeschaltet ist. Für *P* ist in obenstehender Formel die Differenz des angehängten Gewichtes und des von dem

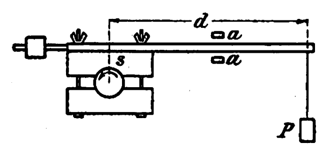
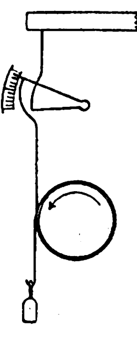


Abb. 80. Pronyscher Zaum.


Abb. 81. Seilbremse.

Federdynamometer angegebenen Zuges zu setzen; für *d* der halbe Durchmesser der Seilscheibe (Seildicke berücksichtigen!). Durch Anschläge muß dafür gesorgt werden, daß das Gewicht mit Seil nicht weggeschleudert werden kann.

Über Flüssigkeitsbremsen s. Z. d. V. d. I. 1907, S. 607. Selbsttätige Einstellung bei Robertson, Electrician Bd. 69 S. 525, 1912.

Mechanische Bremsen pflegen unruhig zu arbeiten. Durchaus ruhige Einstellungen und damit genauere Resultate erhält man mit Wirbelstrombremsen (Pasqualini, Elettricista 1892, S. 177; Rieter, ETZ 1901, S. 195; Feußner, ETZ 1901, S. 608; Siemens & Halske, Nachrichten 1902, Nr. 32, Morris Lister, Journ. Inst. El. Eng. 1904, Bd. 35, S. 445. Rüdenberg; Energie der Wirbelströme in elektrischen Bremsen und Dynamomaschinen. Ferd. Enke, Stuttgart 1906). Bei diesen Bremsen rotiert eine auf die Achse des Motors aufgesetzte Metallscheibe zwischen den Polen eines Elektromagnets. Der Elektromagnet ruht auf Schneiden; dem durch die Wirbelströme in der Metallscheibe auf ihn ausgeübten Drehmoment wird durch aufgelegte Gewichte das Gleichgewicht gehalten. Durch Regulieren der Erregung des Elektromagnets kann man die abgebremste Leistung in weiten Grenzen ändern und in feinsten Abstufungen einstellen. Die Bremsen werden vorzugsweise für kleinere Leistungen (bis etwa 5 kW) gebaut. Die in der Bremsscheibe durch Wirbelströme erzeugte Wärme kann bei diesen Leistungen durch Wasserspülung abgeführt werden. Durch einen besonderen Versuch ist die Leistung zu bestimmen, die durch Aufsetzen der leerlaufenden Bremsscheibe (Luftreibung) benötigt wird.

Handelt es sich um größere Leistungen, so wird die Wirbelstrombremse durch eine Bremsdynamo ersetzt, d. i. eine Dynamomaschine, deren Ständer mittels

Kugellager drehbar um die Achse der Maschine gelagert ist (Abb. 82). Die Maschine wird durch einen Regulierwiderstand belastet; dadurch wird auf den Ständer ein Drehmoment ausgeübt. Ein am Ständer befestigter Hebelarm trägt Laufgewichte und eine Wagschale. Durch Einstellen der Gewichte wird das auf den Ständer übertragene Drehmoment gemessen (Langer u. Finzi, Zschr. Ver. D. I. 1914, S. 41). Über einen als Bremsdynamo ausgearbeiteten Turbogenerator s. König, Helios 1910, S. 431.

(236) Drehmoment. Man befestigt an der Ankerachse einen zur letzteren senkrecht stehenden Arm, an welchem eine Feder oder andere Kraft angreift, um die Drehung des Ankers zu verhindern, wenn dem Anker die zu seinem Betrieb bestimmten Ströme zugeführt werden, und zwar bestimmt man, um die Reibung zu berücksichtigen, die beiden Kräfte, bei denen der Anker gerade in der einen oder anderen Richtung anfangen will sich zu drehen, und nimmt das Mittel. Dieses mit dem Hebelarm multipliziert ergibt das Drehmoment, das das Feld auf die Ankerströme ausübt. Über die experimentelle Bestimmung des Trägheitsmomentes von Ankern ETZ 1917, S. 182.

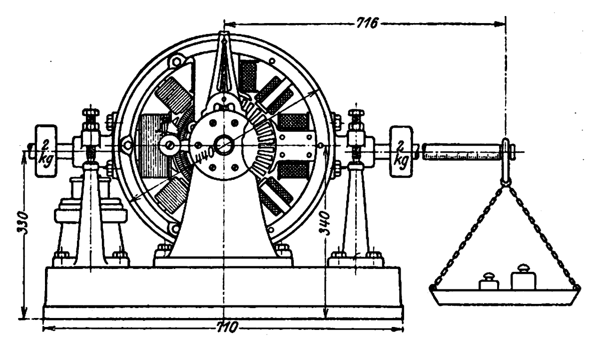


Abb. 82. Elektrodynamische Leistungswage von Dr. Max Levy.

(237) Wirkungsgradbestimmungen an Maschinen und Transformatoren können grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen gemacht werden. Entweder es werden die Maschinen und Transformatoren betriebsmäßig belastet und die zugeführten und abgegebenen Leistungen gemessen, oder man mißt nur die Verluste einzeln ohne die Maschinen betriebsmäßig zu belasten und berechnet daraus den Wirkungsgrad. Im zweiten Fall werden in der Regel die sogenannten „zusätzlichen Verluste" nicht berücksichtigt, so daß dabei ein günstigerer Wirkungsgrad herauskommt, als bei der direkten Methode.

Bei der Bestimmung der Erwärmung muß die Maschine betriebsmäßig belastet werden; die Temperatur nähert sich nur sehr langsam ihrem Endwert; je größer die Maschine ist, um so längere Zeit dauert es, bis er erreicht ist. Über abgekürzte Erwärmungsversuche s. z. B. Electrician Bd. 71, S. 972.

Die Wirkungsgradbestimmungen nach der direkten Methode und namentlich die Erwärmungsversuche erfordern einen sehr großen Energieaufwand. Man ist daher bestrebt, durch geeignete „Sparschaltungen" die von der Maschine abgegebene Energie wieder zurück zu gewinnen. Hierfür besteht eine große Mannigfaltigkeit, die den örtlichen Verhältnissen anzupassen ist. Beispiele für Sparschaltungen s. (238), (248).

Messungen an Gleichstrommaschinen.

(238) Wirkungsgrad. Leerlaufmethode. Man bringt die Bürsten der Maschine in die neutrale Stellung (ETZ 1908, S. 1049) und mißt die Leistung, die zugeführt werden muß, wenn die Maschine als Motor leer läuft. Zieht man davon

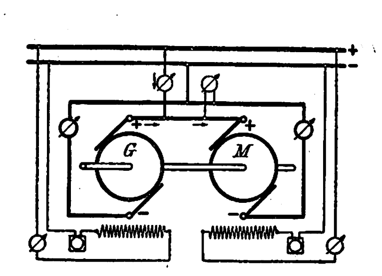
die in Magnetwicklung und Anker erzeugte Joulesche Wärme ab ($i_e^2 R_e + i_a^2 R_a$), so erhalte man N_l. Dann ist der Wirkungsgrad der belasteten Maschine

als Generator $\eta = \frac{V(I_a - I_e)}{V I_a + N_l + I_a^2 R_a}$

als Motor $\eta = \frac{V I_a - N_l - I_a^2 R_a}{V(I_a + I_e)}$

(V Klemmenspannung, Ia Ra Strom und Widerstand im Anker, Ie Re Strom und Widerstand in der Erregerwicklung.)

Die indirekte elektrische Methode wird mit Vorteil angewandt, wenn zwei einander gleiche Maschinen zur Verfügung stehen (vgl. Brion, ETZ 1909, S. 865). Am bequemsten sind die Kappschen Schaltungen. Die beiden Maschinenanker werden miteinander gekuppelt, so daß sie mit derselben Drehzahl laufen müssen. Man reguliert die Erregungen derart, daß die eine Maschine als Motor, die andere als Generator arbeitet. In der Schaltung der Abb. 83 haben Generator und Motor dieselbe Spannung. Der Wirkungsgrad jeder Maschine ist $\sqrt{I_g/I_m}$. In Abb. 84 dagegen ist der Strom in beiden Maschinen der gleiche und der Wirkungsgrad wird $\eta = \sqrt{V_g/V_m}$ (V Klemmenspannung).



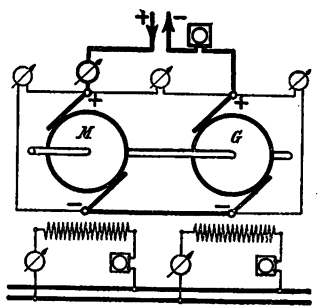


Abb. 83 und 84. Wirkungsgrad nach der indirekten elektrischen Methode.

Die Schaltungen werden als Sparschaltungen bezeichnet, weil das Netz nur die Differenz der vom Motor aufgenommenen und der vom Generator abgegebenen Energie herzugeben hat.

Theoretische Bedenken gegen die Kappschen Schaltungen werden vermieden durch die Schaltungen von Hutchinson und Blondel (s. Brion, a. a. O.). Über die Prüfung von Bahnmotoren nach dieser Methode Electrician Bd. 70, S. 727, 1913.

(239) Messung der Verluste. Die Verluste entstehen durch Reibung in den Lagern und an den Bürsten, durch Hysterese, durch Wirbelströme im Eisen, in Wicklungen und in starken Konstruktionsteilen und durch Stromwärmeerzeugung in den stromführenden Teilen. Die Verluste sind zum Teil von der Temperatur abhängig; man muß daher bei genauen Messungen erst die Maschine genügend lange Zeit unter Last laufen lassen.

Zuweilen ist es von Interesse, zu wissen, in welcher Weise sich die Gesamtverluste aus den Teilverlusten zusammensetzen.

Die Verluste durch Stromwärme sind nach dem Jouleschen Gesetz zu berechnen. Die übrigen Verluste werden mittels der Leerlaufkurve (238), der Auslaufkurve (240) und auf andere Weise bestimmt, entweder zusammen oder getrennt.

(240) Auslaufkurve (Deprez, C. R. Bd. 94, S. 861. — Routin, Electricien, Paris, Bd. 15, S. 42. — Dettmar, ETZ 1899, S. 203, 381. — Liebenow, ETZ 1899, S. 274. — Peukert, ETZ 1901, S. 393. — Ytterberg, ETZ 1912, S. 1158). Der Anker einer im Laufe befindlichen Maschine enthält

einen Arbeitsvorrat $A = {}^1/_2 J\omega^2$, worin J das Trägheitsmoment, ω die Winkelgeschwindigkeit bedeutet. Hören äußere Zufuhr und Abgabe von Energie auf, so läuft der Anker weiter, und sein Verbrauch durch Reibung usw. ist

$$N = \frac{dA}{dt} = J\,\omega\,\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J\,n\,\frac{dn}{dt},$$

wobei ω nach und nach bis zum Stillstand abnimmt (n Drehzahl in der Minute). Man beobachtet ω zu verschiedenen Zeiten. Hierzu kann man das Tachometer nur verwenden, wenn dessen Arbeitsverbrauch den Versuch nicht beeinflußt. Dettmar empfiehlt, die Spannung im Anker unter Wirkung des remanenten Magnetismus zu benutzen und sie durch eine Messung am Anfang der Beobachtungsreihe auf das Tachometer zu beziehen. Auch kann man einen Umlaufzähler anlegen und jede Minute ablesen; man erhält dadurch angenähert die Geschwindigkeit für die Mitte der Minute.

Trägt man die Zeit als Abszisse, die Geschwindigkeit als Ordinate auf, so erhält man die Auslaufkurve. Die Tangente an die Kurve gibt $d\omega/dt$ für jeden Punkt. $\omega d\omega/dt$ ist die Subnormale (Vorsicht wegen Wahl der Einheiten von Abszissen und Ordinaten!). Durch Multiplikation mit J erhält man die Leistung N, die der Anker in jedem Augenblick zur Überwindung der Reibung usw. abgibt.

Läßt man die Maschine zunächst ohne Erregung mit abgehobenen Bürsten auslaufen, so erhält man das Drehmoment der Lager und Luftreibung in Abhängigkeit von der Drehzahl. Wiederholt man den Versuch, nachdem die Bürsten aufgelegt sind, so ergibt die Zunahme des Drehmomentes die Bürstenreibung. Wird bei einem dritten Versuch die Maschine erregt, so kommen noch die magnetischen Verluste hinzu. — Die Auslaufversuche müssen mit großer Sorgfalt angestellt werden, wenn man zuverlässige Resultate erhalten will.

(241) Reibungsverluste. a) Methode von Kapp, Hummel, Dettmar. Man läßt die Maschine als Motor leer laufen, und zwar verringert man allmählich die Erregerstromstärke von ihrer normalen Größe und reguliert die Ankerspannung derart, daß die Drehzahl dauernd konstant bleibt. Man mißt die dem Anker zugeführte elektrische Leistung und verringert sie um die Joulesche Wärme im Anker. Dann trägt man in einem Koordinatensystem die EMK des Ankers (Klemmenspannung minus $I_a R_a$), als Ordinate die korrigierte Leistung auf. Die so gewonnene Kurve extrapoliert man auf die EMK Null; da hier die magnetischen Verluste verschwinden, so muß die Kurve auf der Ordinatenachse ein Stück abschneiden, welches die Reibungsleistung darstellt.

Die zahlreichen für diese Methode notwendigen Messungen werden verringert durch die Methode von Kinzbrunner (ETZ 1903, S. 451). Kinzbrunner unterbricht den Erregerkreis und legt Spannungen von ${}^1/_5$ bis ${}^1/_{15}$ der Normalspannung an den Anker. Dann läuft die Maschine bei geeigneter Bürstenstellung, und zwar wird das Feld im wesentlichen durch den Ankerstrom selbst erzeugt. Hysterese und Wirbelstromverluste sind hierbei außerordentlich gering; mißt man also die vom Anker aufgenommene Leistung und zieht davon die ohmischen Verluste ab, so erhält man die Reibungsverluste in Abhängigkeit von der Drehzahl (Peukert, ETZ 1916, S. 217).

(242) Trennung der Verluste durch Hysterese und Wirbelströme. Die Maschine läuft als Motor ohne Belastung mit konstanter Erregung durch Fremdstrom; der Strom im Anker ist noch so schwach, daß das Feld von ihm nicht gestört wird; die Spannung am Anker ist demnach der Geschwindigkeit proportional. Das Produkt Spannung am Anker × Strom gibt die Verluste, von denen Lager- und Bürstenreibung und Hysterese proportional der Geschwindigkeit n, Wirbelströme proportional n^2 sind. Hieraus folgt

$$EI = an + bn^2$$

und nach Division mit E, das zu n proportional ist,

$$I = A + Bn.$$

Trägt man also n als Abszisse, I als Ordinate auf (Abb. 85), so erhält man eine Gerade PQ für eine bestimmte Erregung ($P'Q'$ für eine andere); zieht man durch P die Wagrechte, so gibt für eine bestimmte Geschwindigkeit S die Fläche $OPRS$ den Verlust durch Hysterese, Bürsten- und Lagerreibung, das Rechteck $PR \times RQ$ den Verlust durch Wirbelströme. Sind Bürsten- und Lagerreibung durch besondere Versuche bestimmt, so ist der übrig bleibende Teil der Fläche von $OPRS$ der durch Hysterese entstandene Verlust.

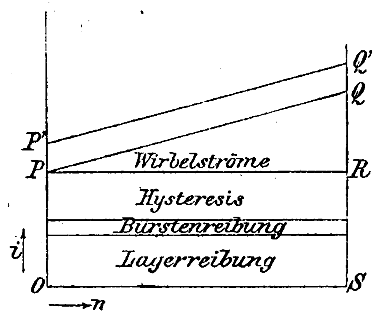


Abb. 85. Trennung der Verluste.

(243) Charakteristik. Spannungsänderung der Gleichstromgeneratoren und Änderung der Tourenzahl der Motoren gehen aus den sogenannten Charakteristiken hervor (412). Die Leerlaufcharakteristik wird bei Nebenschluß- oder fremd erregten Maschinen aufgenommen; sie gibt die Klemmenspannung bei Leerlauf in Abhängigkeit von Erregerstrom bei konstanter Tourenzahl und gestattet dadurch ein Urteil über die magnetische Sättigung der Maschine.

Die äußere Charakteristik einer Nebenschlußmaschine gibt den Zusammenhang zwischen Klemmenspannung P und Belastungsstrom I bei konstanter Tourenzahl bzw. Betriebstourenzahl. Nimmt man statt der Klemmenspannung die EMK der Maschine [$E = P + I R_a$ (408)], so erhält man die sogenannte Gesamtcharakteristik.

Messungen an Wechselstrommaschinen.

(244) Wechselstromgeneratoren und Synchronmotoren. Ist für einen Wechselstromgenerator eine induktive Last vorgeschrieben, so läßt man ihn am besten auf einen Synchronmotor arbeiten, durch dessen Erregung man auf den vorgeschriebenen Leistungsfaktor reguliert. Die beste Sparschaltung erhält man in der Weise, daß man den zu untersuchenden Generator von einem Gleichstrommotor antreiben läßt und durch einen Synchronmotor belastet, der seinerseits eine auf das Gleichstromnetz arbeitende Gleichstrommaschine antreibt.

Besitzt der Generator mehrere Wicklungen, so erhält man eine künstliche Belastung dadurch, daß man die Wicklung in zwei ungleiche Teile zerlegt und unter Zwischenschaltung eines geeigneten Widerstandes gegeneinander schaltet.

(245) Leerlauf-, Belastungs- und Kurzschlußcharakteristik (464). Die Leerlaufcharakteristik wird bei konstanter Drehzahl aufgenommen; sie gibt die Spannung als Funktion des Erregerstromes. Die Belastungscharakteristiken werden ebenfalls wie bei Gleichstrommaschinen ausgeführt, doch werden sie für verschiedene Leistungsfaktoren getrennt aufgenommen.

Die Kurzschlußcharakteristik erhält man, indem man bei konstanter normaler Drehzahl die einzelnen Phasen des Generators durch Amperemeter kurz schließt und die Kurzschlußstromstärke I_k in Abhängigkeit vom Erregerstrom mißt.

Man entnimmt nun, zur selben Erregerstromstärke gehörig, die Leerlaufspannung E_λ und die Kurzschlußstromstärke I_k, dann ist: $\omega L_a = \sqrt{E_\lambda^2 / I_k^2 - R_a^2}$ (R_a Ankerwiderstand, L_a Selbstinduktivität des Ankers). Da die Magnetisierung bei der belasteten Maschine viel höher ist als beim Kurzschluß, so ist der durch den Kurzschlußversuch gewonnene Wert von L_a nur angenähert als richtig anzusehen.

Eine weitere Charakteristik bildet die sogen. *V*-Kurve. Man läßt den Generator als Synchronmotor laufen und bestimmt bei konstanter Belastung den Ankerstrom in seiner Abhängigkeit vom Erregerstrom (483).

(246) Asynchrone Induktionsmotoren. Über Dauerprobe und Bestimmung des Wirkungsgrades gilt das früher Gesagte (237). In den Kurven trägt man zweckmäßig als Abszisse die zugeführte elektrische Leistung, als Ordinaten folgende Größen auf: 1. Leistungsfaktor, 2. Stromstärke im Ständer, 3. Wirkungsgrad, 4. Schlüpfung, 5. abgegebene Leistung, 6. Drehmoment des Läufers, 7. Einzel- und Gesamtverluste.

Mißt man die Leerlaufarbeiten in Abhängigkeit von der Klemmenspannung, so erhält man eine Kurve für Verluste, die sich aus Eisenverlust im Ständer und Reibungsverlust zusammensetzt, wobei freilich die geringen Eisenverluste im Läufer vernachlässigt werden. Will man dies nicht tun, so muß man den Läufer während der Versuche durch einen Synchronmotor antreiben.

Benischke benutzt zur Trennung der Leerlaufverluste den Satz, daß innerhalb sehr kleiner Leistungen die Schlüpfung der Belastung proportional gesetzt werden darf. Trägt man also die Belastungen als Abszissen, die Schlüpfung als Ordinaten auf, so erhält man eine gerade Linie, die rückwärts verlängert auf der Abszissenachse ein Stück abschneidet, welche die durch Luft- und Lagerreibung hervorgerufene Belastung bedeutet (vgl. auch ETZ 1903, S. 35, 92, 174, 448 und 662).

(247) Um das **Kreisdiagramm** des Induktionsmotors zeichnen zu können, wird zunächst der Magnetisierungsstrom (aus Spannung und Leerlaufverbrauch) in Abhängigkeit von der Spannung aufgenommen. Danach wird der Läufer festgebremst und kurz geschlossen und bis zu Spannungen, die etwa zwischen 5 bis 10 % der normalen liegen, Spannung, Strom und Verbrauch gemessen; daraus wird der ideale Kurzschlußstrom (für einen verlust- und widerstandslosen Motor) berechnet. Näheres s. (503).

Messungen an Transformatoren.

Von Wirkungsgrad- und Erwärmungsmessungen an Transformatoren gilt sinngemäß das in (237) Gesagte. Der Wirkungsgrad der Transformatoren ist in der Regel sehr hoch; daher ist die Wirkungsgradbestimmung durch Verlustmessung meist die zuverlässigere.

(248) Verlustmessung. a) Direkte Messung. Der Verlust durch Hysterese ist dem Quadrate, der durch Wirbelströme der ersten Potenz der Frequenz proportional. Bestimmt man bei gleichbleibender Induktion im Eisen die Verluste für verschiedene Frequenzen, so kann man hysteretische und Wirbelverluste ebenso trennen, wie es in (242) für Gleichstrommaschinen angegeben ist. Beide Verluste zusammen werden mit dem Leistungsmesser bestimmt, wobei man den Stromwärmeverlust im Kupfer, $I^2 R$, von dem abgelesenen Meßergebnis abzuziehen hat; es wird also auch eine Strommessung erforderlich.

b) Mit dem Hilfstransformator nach Ayrton & Sumpner (Electrician Bd. 29, S. 615), Abb. 86. Zwei gleiche Transformatoren, T_1 und T_2 werden mit ihren primären Spulen parallel, mit ihren sekundären Spulen gegeneinander geschaltet. In Reihe mit der primären Spule des einen, T_2, liegt die sekundäre Spule eines kleinen Hilfstransformators, T_3, dessen primäre Spule mit einem Regulierwiderstand an die Hauptleitungen angeschlossen ist. Wenn u_3 offen, u_1 und u_2 geschlossen sind, so verbrauchen die Transformatoren fast keinen Strom. Schließt man aber u_3 und reguliert den Widerstand r_3, so fließt durch die primären Spulen ein starker Strom, der am Strommesser i gemessen wird. Dieser Strom bestreitet die Kupferverluste; er ist mit der Spannung e in gleicher Phase und wird von dem Transformator T_3 geliefert, dessen Leistung der Leistungsmesser P_3 mißt. Die Eisenverluste in T_1 und T_2 werden durch die Leistung N

bestritten, welche der Leistungsmesser P angibt. Von der Summe $N + N_3$ ist noch der Verlust im Kupfer der Leitungen und Meßinstrumente abzuziehen; öffnet man u_1, während u_2 und u_3 geschlossen und die Transformatoren T_1 und T_2 kurz geschlossen sind, so liefert T_3 diejenige Leistung, welche die Kupferverluste deckt. Nach Subtraktion dieser Leistung von $N + N_3$ bleibt als Verlust N'. Bei der Berechnung des Wirkungsgrades ist die Schaltung von T_3 zu beachten; kommt die sekundäre Spannung von T_3 zu der primären von T_2 hinzu, so ist die Belastung von $T_1 = E\,I$ (getrennt gemessen, vgl. Abbildung), und T_2 empfängt dieselbe Leistung, vermehrt um die Verluste. Ist T_3 anders geschaltet, so daß die Spannung an T_2 kleiner ist als an T_1, so ist die Belastung in T_1 wieder $E\,I$, die von T_2 aber $E\,I$, vermindert um die Verluste. Der Transformator mit der größeren Belastung nimmt diese von den Leitungen auf, der andere erstattet die kleinere Leistung an die Leitungen zurück. Der Wirkungsgrad eines der beiden Transformatoren ist

$$1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{N'}{E\,I}$$

mit einer für praktische Zwecke genügenden Genauigkeit. Die Methode ist auf Transformatoren mit geschlossenem Eisenkerne beschränkt.

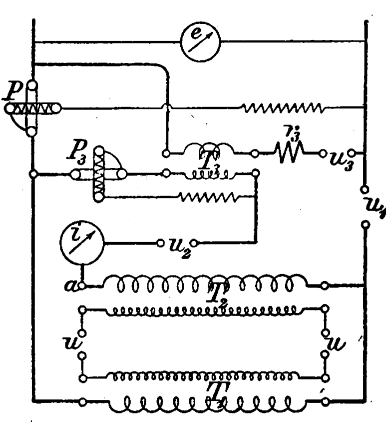


Abb. 86. Verlustmessung mit Transformationen.

Für Transformatoren mit offenem Eisenkerne haben Ayrton und Sumpner eine andere Schaltung angegeben, bei der die sekundäre Spule von T_3 mit den sekundären Spulen von T_1 und T_2 in Reihe geschaltet ist. Man trennt die Leitung (Abb. 86), in der die primäre Spule von T_2 liegt, bei P_3 von der Hauptleitung und bei a von T_2, verbindet a mit der Hauptleitung, schaltet das Stück, welches P_3 und die sekundäre Spule von T_3 enthält, bei u zwischen die sekundären Spulen von T_1 und T_2, den Strommesser vor die primäre Spule von T_1. T_1 ist der zu untersuchende Transformator mit offenem magnetischen Kreise, T_2 ein schon vorher genau untersuchter Transformator mit geschlossenem Eisen. Man hält die sekundäre Spannung von T_1 konstant und schaltet T_3 so, daß die sekundäre Spannung von T_2 kleiner als die von T_1 ist; beide Spannungen werden gemessen. Die Verluste in T_1 und T_2 zusammen werden wie vorher gemessen; die von T_2 sind bekannt; subtrahiert man sie von der vorigen Summe, so erhält man die von T_1 allein.

c) Mit Umschaltung der Spulen nach Korda (ETZ 95, S. 813). Soll ein einziger Transformator vor seiner Fertigstellung untersucht werden, so kann man Teile der primären und der sekundären Windungen gegeneinander schalten, so daß zwar die Stromstärken des Betriebes erreicht werden, daß aber nur Bruchteile der Spannungen zur Geltung kommen. Es seien m_1 und m_2 die primäre und die sekundäre Windungszahl, f die Frequenz, $\mathfrak{B}$ der Höchstwert der Induktion im Eisen, q der Querschnitt des letzteren. Man teilt dann die primäre Spule in zwei Teile:

$$\frac{m_1}{2} + \frac{m_1}{m_2} \cdot m' \quad \text{und} \quad \frac{m_1}{2} - \frac{m_1}{m_2} \cdot m'$$

und die sekundäre gleichfalls in zwei Teile:

$$\frac{m_2}{2} + m' \text{ und } \frac{m_1}{2} - m',$$

worin

$$m' = \frac{10^8}{\sqrt{2}} \cdot \frac{r_2 i_2}{2\pi f \mathfrak{B} q},$$

schaltet die Teile der primären Spule gegen- und hintereinander und die der sekundären einfach gegeneinander; in den kurz geschlossenen sekundären Kreis legt man noch einen Strommesser, der primären Spule führt man die nach (198ff.) gemessene elektrische Leistung zu. Hat man in beiden Spulen die Ströme, welche im Betrieb herrschen sollen, so gibt die zugeführte Leistung die Verluste an.

d) Verluste im Eisen allein, Eisenuntersuchung, vgl. (225).

(249) Spannungsabfall eines Transformators. 1. Methode nach Feldmann. Zwei gleiche Transformatoren werden mit den sekundären Spulen gegeneinander geschaltet und nur der eine belastet. Der Spannungsmesser e gibt den Spannungsabfall an (Abb. 87).

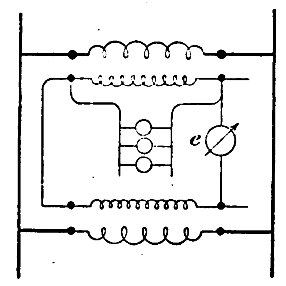


Abb. 87. Messung des Spannungsabfalles nach Feldmann.

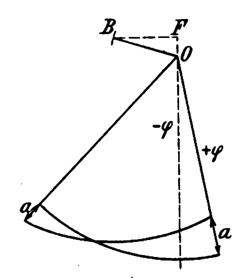


Abb. 88. Kappsches Diagramm.

2. Methode nach Kapp (ETZ 1895, S. 260). Die sekundäre Spule wird durch einen Strommesser kurz geschlossen und die primäre mit einem Strom der passenden Frequenz und solcher Spannung gespeist, daß der Strommesser den regelmäßigen Betriebsstrom anzeigt. Mit der gemessenen primären Klemmenspannung, die noch durch das Umsetzungsverhältnis geteilt wird, beschreibt man von O (Abb. 88) aus einen Bogen, Radius OB; dann errichtet man in O eine Senkrechte, deren Länge OF gleich den ohmischen Spannungsverlusten in beiden Spulen des Transformators ist, und in F eine Wagrechte FB. Nun beschreibt man aus O und B Kreise mit gleichem Radius, der gleich der sekundären Klemmenspannung bei Leerauf nach dem Maßstab von OB ist. Die von O unter einem Winkel φ gegen FO gezogenen Strahlen werden von beiden Kreisen geschnitten; die Schnittstücke a sind die Spannungsabfälle oder -erhöhungen bei den verschiedenen Verzögerungs- oder Voreilungswinkeln. Die Richtung von OB bleibt bei derselben Frequenz dieselbe, die Länge ändert sich der Stromstärke proportional. Bei Verringerung der Frequenz rückt B gegen F hin. Vereinfachtes Diagramm bei Imhof, Arch. f. El. Bd. 7, S. 121.

Literatur: Brion, Leitfaden zum elektrotechnischen Praktikum. Leipzig 1910. — Kinzbrunner, Die Prüfung von Gleichstrommaschinen. Berlin 1904. — Krause, Messungen an elektrischen Maschinen. — Normalien des V.D.E. für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren. — Die allgemeinen Lehrbücher für elektrische Maschinen und Transformatoren, wie Kittler, Arnold, Thomälen. — Prüfung an Ort und Stelle z. B. ETZ 1912, S. 143.

Messungen in elektrischen Anlagen.

(250) Isolationsmessung. Die Isolationsmessung hat den Zweck, zu ermitteln, ob eine Anlage derart ordnungsgemäß installiert ist, daß im Betriebe nennenswerte fehlerhafte Stromentweichungen ausgeschlossen sind. Dementsprechend tragen die Isolationsprüfungen meistens den Charakter von Strommessungen; trotzdem drückt man gewohnheitsmäßig der Kürze halber die Isolation in Ohm aus, indem man den Fehlerstrom i in die Betriebsspannung E dividiert und dadurch einen Isolationswiderstand R erhält, dessen Höhe für die Güte der Installation maßgebend ist.

Bei der Prüfung der Anlagen wird festgestellt

1. die Isolation der Leitungen gegen Erde;
2. die Isolation der Leitungen gegeneinander.

Da die Isolationsprüfung die Ermittlung fehlerhafter Stromentweichungen im Betriebe bezweckt, sollen, wenn irgend angängig, die Isolationsmessungen mit der Betriebsspannung ausgeführt werden; ist die Prüfspannung wesentlich niedriger als letztere, so ergibt die Isolationsmessung erfahrungsgemäß keine genügende Sicherheit.

Die Isolationsprüfungen sollen bei Herstellung der Anlage, bei ihrer Abnahme und alsdann in geeigneten Zwischenräumen angestellt werden, deren Dauer sich nach den Betriebsverhältnissen der einzelnen Anlagen richtet. Bezüglich der Höhe des zu fordernden Isolationswiderstandes, der Häufigkeit der Messungen und der Art und Weise, wie sie vorgenommen werden sollen, sei auf die Errichtungs- und die Betriebsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker verwiesen, sowie die zugehörigen Erläuterungen von Dr. C. L. Weber und der Vereinigung der Elektrizitätswerke. Für Niederspannungsanlagen ist als zulässige Stromentweichung für jede durch Herausnehmen von Sicherungen abtrennbare Teilstrecke einer Leitungsanlage 1 mA festgesetzt worden; bei einer Betriebsspannung von 110 V betrüge hiernach der mindestzulässige Isolationswiderstand 110 000 Ω, bei 220 V 220 000 Ω usw.

Ergibt sich bei der Isolationsprüfung ein Fehler, so ist dieser zunächst durch Zerlegung der Anlage in ihre Teilstrecken zu lokalisieren; sobald eine weitere Unterteilung der fehlerhaften Strecke nicht mehr angängig ist, kann der Ort des Fehlers nach den für Telegraphenleitungen üblichen Methoden bestimmt werden, sofern nicht eine Besichtigung der betr. Leitung die Fehlerstelle finden läßt (Apparate, Wanddurchgänge, feuchte Mauerstellen usw.).

Die Isolationsprüfungen können, je nachdem die Betriebsverhältnisse es gestatten, entweder an stromlosen oder an stromdurchflossenen Leitungen vorgenommen werden. Bezüglich der theoretischen Grundlagen dieser Messungen siehe Raphael-Apt, „Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen (2. Auflage, Berlin 1911), sowie Schleiermacher, ETZ 1909, S. 141, auch Hausrath, Elektrotechnik und Maschinenbau, Heft 45 u. 46, 1910.

(251) Isolationsmessung stromloser Leitungen. A. Mit besonderer Stromquelle. Das eine Ende der zu prüfenden Leitung wird mit dem einen Pole der Meßstromquelle verbunden, das andere Ende isoliert; der zweite Pol der Stromquelle wird an Erde gelegt oder mit der zugehörigen Nebenleitung verbunden, je nachdem die Isolation einer Leitung gegen Erde oder zweier Leitungen gegeneinander gemessen werden soll. Zeigt nun ein in den Stromkreis eingeschaltetes Meßinstrument den Strom i an, und ist die Spannung der Stromquelle $= E$, so ist der Isolationswiderstand der ganzen Anlage gegen Erde $= E/i$; auch kann das Galvanometer, wenn es immer mit derselben konstanten Batterie verbunden ist, gleich nach Widerstand geeicht werden. In Einzelfällen, besonders bei hoher Isolation, können auch die für Telegraphenkabel üblichen Methoden Anwendung finden.

Der tragbare Isolationsprüfer besteht aus einem aperiodischen Drehspulengalvanometer, das mit einem Gleichstrominduktor zusammengebaut ist.

Das Galvanometer reagiert nur auf Gleichstrom, die Apparate können aber auch zur Messung der Isolation von wechselstromdurchflossenen Leitungen benutzt werden, wobei die Wechselstromspannung nicht wesentlich höher sein soll als die vom Induktor gelieferte elektromotorische Kraft.

Die den Ausschlägen entsprechenden Isolationswerte werden einer besonderen Tabelle entnommen. Der Meßbereich beträgt $10^8\ \Omega$, die Induktoren werden normal bis 1000 V ausgeführt.

B. Mit der Betriebsspannung. Direkte Messungen von Isolationen gegen Erde mit der Betriebsspannung setzen voraus, daß der eine Pol der Betriebsmaschine geerdet ist oder ohne Nachteil für die Dauer der Messung geerdet werden kann, beispielsweise bei Dreileiteranlagen mit geerdetem Mittelleiter oder Zweileiteranlagen, bei denen beide Pole von Erde isoliert sind. Die zu prüfende Leitung wird mit dem einen Pol des Netzes unter Zwischenschaltung eines Meßinstrumentes, wozu ein Spannungsmesser besonders sich eignet, verbunden, der zweite Pol, wenn nicht betriebsmäßig geerdet, an Erde gelegt. Der Spannungsmesser zeige dabei E_1 Volt; sein Widerstand sei $= g$, die Betriebsspannung $= E$. Dann ist der Isolationswiderstand

$$R = \frac{g \cdot (E - E_1)}{E_1}.$$

Will man die Isolation zweier Leitungen gegeneinander prüfen, so verbinde man die eine Leitung direkt mit dem einen, die zweite unter Einschaltung des Spannungsmessers mit dem anderen Pole; erhält man hierbei unter der Betriebsspannung E den Ausschlag E_1, so berechnet sich die gesuchte Isolation nach der gleichen Formel wie oben bei der Messung gegen Erde.

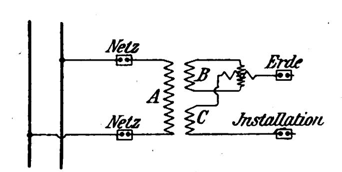


Abb. 89. Isolationsprüfer für Wechselstrom.

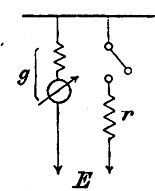


Abb. 90. Nebenschlußmethode.

Die unmittelbare Prüfung mit dem Spannungsmesser gegen Erde ist im allgemeinen nur bei Gleichstromanlagen angängig, sie versagt bei Wechselstromnetzen, weil hierbei eine Erdung des einen Poles meist nicht möglich ist. Durch Transformation kann man sich aber hierbei Einrichtungen schaffen, die die Erdung auf den Meßstromkreis beschränken. Das von der AEG nach diesem Prinzip gebaute Meßinstrument besteht aus einem Meßtransformator mit einer primären und zwei sekundären Wicklungen; die erstere A (Abb. 89) wird an das Netz angeschlossen, die eine der sekundären B mit der festen Spule des Dynamometers verbunden, die andere C einerseits mit der zu untersuchenden Leitung (Klemme „Installation"), anderseits über die bewegliche Spule des Dynamometers mit Erde; diese letztere Wicklung hat die gleiche Windungszahl wie die primäre, die Windungszahl der sekundären Wicklung B wird so gewählt, daß der Strom in der festen Spule stark genug wird. Zur Messung der Betriebsspannung werden die Klemmen „Installation" und „Erde" durch einen Draht verbunden. Die Skale zeigt Volt und Ohm; weicht die Betriebsspannung bei der Messung (E') ab von derjenigen (E), für welche die Widerstandsteilung bestimmt ist, so ist der abgelesene Widerstandswert mit $(E/E')^2$ zu multiplizieren oder die oben angegebene Formel

$R = g \cdot (E - E_1) / E_1$ zu benutzen, worin g den Leitungswiderstand des Instrumentes zwischen den Klemmen „Installation“ und „Erde“ bedeutet.

In ausgedehnten Leitungsnetzen, besonders bei Erdkabeln werden die Ergebnisse der Wechselstrommessung durch die Kapazitätsströme beeinflußt. In Anlagen kleineren Umfangs können die hierdureh entstehenden Meßfehler vernachlässigt werden.

(252) Isolationsmessung an stromführenden Leitungen. Solche Messungen, d. h. die Feststellung fehlerhafter Stromentweichungen während des Betriebes, sind mit großen Schwierigkeiten verbunden, sie versagen praktisch vollkommen in großen Anlagen, weil die Fehlerströme im Verhältnis zum Gesamtstrom der Anlage verschwindend klein sind. Sie machen sich auch vielfach durch Störungen (Telephonstörungen usw.) weit eher bemerkbar, als sie der Messung zugänglich sind.

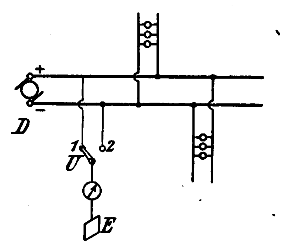
Für Anlagen geringerer Größe sind unter Umständen Methoden verwendbar, die sich auf Strommessung stützen [1]). Eine solche ist die Nebenschlußmethode von Fröhlich. An irgendeinen Punkt des Leitungsnetzes legt man ein Voltmeter (Widerstand g einschl. Vorschaltung) und mißt die Spannung gegen Erde $= E_1$. Darauf legt man neben das Voltmeter einen Nebenschluß r und mißt abermals die Spannung des Punktes gegen Erde $= E_2$ (Abb. 90). Dann ist der Isolationswiderstand R gegeben durch

$$\frac{1}{R} = -\frac{1}{g} + \frac{1}{r} \cdot \frac{E_2}{E_1 - E_2}.$$

Bequem ist es, r so lange zu verändern, bis $E_2 = \frac{1}{2} E_1$; dann hat man

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} - \frac{1}{g}.$$

Wegen der bereits erwähnten Schwierigkeit genauer Messung begnügt sich die Praxis meist mit einfachen Anzeigevorrichtungen, die wenigstens in kleinen Anlagen ein Urteil über den jeweiligen Isolationszustand (Erdschluß) gestatten,



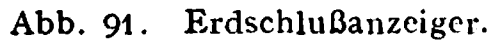


Abb. 91. Erdschlußanzeiger.

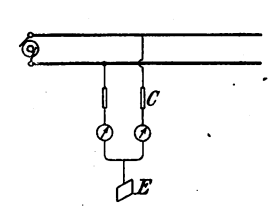


Abb. 92. Dauernde Isolationskontrolle.

Der Erdschlußanzeiger besteht aus einem stromanzeigenden Apparat, dessen eine Klemme mit Erde (Wasserleitung), die andere mit einem Pol der Maschine verbunden wird.

In Abb. 91 bedeutet D die Dynamomaschine; in die Erdleitung wird ein Voltmeter eingeschaltet; liegt in der positiven Leitung ein Isolationsfehler, so zeigt sich ein Ausschlag, wenn die Erdleitung mit Hilfe des Umschalters U mit dem negativen Pol der Maschine verbunden wird, dagegen nicht, wenn man die Erdleitung mit dem positiven Pol verbindet. Der Grad des Ausschlags deutet die Höhe des Erdschlusses an. Eine dauernde Kontrolle des Isolationszustandes erhält man, wenn zwischen jede Leitung und Erde ein Anzeiger geschaltet wird (Abb. 92).

[1]) Näheres siehe: Raphael-Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen, Berlin 1911.

Anleger von Dietze. Für Wechselstromanlagen dient dieser von Hartmann & Braun hergestellte Apparat zum schnellen Aufsuchen von Isolationsfehlern. Er besteht (Abb. 93) aus einem lamellierten Eisenkern, der, aufgeschnitten und mit Scharnieren versehen, nach Art einer Zange geöffnet werden kann, durch eine Feder aber von selbst sich wieder schließt. Die Kernhälften tragen Induktionsspulen, an die ein Telephon angeschlossen wird. Zum Aufsuchen eines Erdschlusses wird der fehlerhafte Pol vorsichtig, d. h. unter Einschaltung eines entsprechenden Widerstandes geerdet, hierauf der Anleger der Reihe nach um die zugänglichen Teile der Leitungen gelegt, beispielsweise in der Nähe der Schalttafeln. Der Fehlerstrom macht sich dann im Telephon durch Brummen bemerkbar; schweigt das Telephon, so ist die Fehlerstelle überschritten und kann nunmehr in dem rückwärts liegenden Teile der Leitung nach und nach enger eingegrenzt werden.

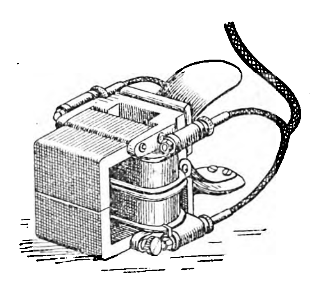


Abb. 93. Anleger von Dietze.

(253) Selbsttätige Meldung der Isolationsfehler in großen Zentralen. 1. System von Agthe und Kallmann (Kallmann, ETZ 1893, Raphael-Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen). Um einen in dem Leitungsnetze aufgetretenen Fehler sofort nach Entstehen in der Zentrale zu signalisieren und seinen Ort zu bestimmen, benutzt man die in Speise- und Verteilungsleitungen vorhandenen Prüfdrähte, welche bezirksweise untereinander verbunden werden, so daß jeder in einer Speiseleitung die Zentrale verlassende Prüfdraht nur in einem begrenzten Gebiete, nämlich dem Versorgungsgebiete der Speiseleitung, sich verzweigt. An einer besonderen Prüfdrahtschalttafel in der Zentrale laufen die Prüfdrähte zusammen und sind mit Meldevorrichtungen versehen; sobald eine solche anspricht, erkennt man, in welchem Bezirk die Störung liegt, und kann dort leicht durch Trennen der Prüfdrähte das fehlerhafte Kabel finden. Die Anwendung der Prüfdrähte zur Fehlermeldung wurde erstmals von Agthe und Kallmann vorgeschlagen. Die Benutzung der Prüfdrähte zur Messung der Spannung an den Speisepunkten wird hierdurch nicht berührt.

Jeder Prüfdraht wird über eine Relaisspule mit dem einen Pol des Leitungsnetzes verbunden, während das zugehörige Kabel am andern Pol liegt. Wenn ein Fehler im Kabel auftritt und die Isolation zwischen Kabel und Prüfdraht hierdurch zerstört wird, so wird durch den auftretenden Strom das in die Prüfdrahtleitung eingeschaltete Relais zum Ansprechen gebracht und so der Fehler gemeldet. Durch eine besondere Schaltung kann die Spannung zwischen Prüfdraht und Kabel auf einen Bruchteil der Betriebsspannung herabgesetzt werden.

2. Das Differentialschutzsystem von Merz und Price (Kuhlmann, ETZ 1908, S. 330) bewirkt die selbsttätige Ausschaltung fehlerhafter Kabelstrecken in Hochspannungsanlagen. Am Anfang und Ende des zu überwachenden Kabels ist jeweils ein Stromwandler eingeschaltet. Die Sekundärwicklungen beider Stromwandler sind durch ein Hilfskabel gegeneinander geschaltet. Im Stromkreis des Hilfskabels fließt erst dann ein Strom, sobald das Hauptkabel fehlerhaft geworden ist; dieser Strom bewirkt mit Hilfe eines in das Hilfskabel eingeschalteten Differentialrelais die Abschaltung des Hauptkabels. Gleichzeitig kann der Fehler auch in der Zentrale selbsttätig gemeldet werden.

(254) Strom- und Spannungsmessung. a) Schalttafelinstrumente. Für Gleichstromanlagen werden fast ausschließlich Drehspuleninstrumente nach Deprez-d'Arsonval oder Weston (136, 137, 141) benutzt, für Wechselstrom hauptsächlich elektrodynamische (144) oder Hitzdrahtinstrumente (150). Durch Verwendung von Nebenschlüssen bei Gleichstrom und von Stromwandlern bei Wechsel-

strom ist für die Strom- und Leistungsmessung die Heranführung der Stromschiene an die Schalttafel nicht mehr nötig; es genügen hierfür dünne Meßleitungen.

Zur Messung der Spannung hochgespannter Wechselströme werden meist Meßtransformatoren, gelegentlich auch elektrostatische Voltmeter für Spannungen bis zu 10000 V benutzt. Auch die Spannungsspulen der Leistungsmesser und Zähler werden an die Meßtransformatoren angeschlossen. Für Meßinstrumente, die nur in einem engen Meßbereich gebraucht werden (z. B. Spannungsmesser zwischen 90 und 120 V oder 180 und 240 V) wird die Skala so eingerichtet, daß sie in diesem Bereich besonders weite Teilung besitzt oder es werden Instrumente mit unterdrücktem Nullpunkt und entsprechend erweiterter Teilung benutzt. Von Bedeutung für Wechselstromanlagen sind auch Meßinstrumente zur Messung des Blindstromes ($I \sin \varphi$), manchmal Phasometer genannt.

b) Registrierinstrumente. Zur dauernden Überwachung der Betriebsspannung und der Belastungsverhältnisse werden selbstregistrierende Voltmeter, Amperemeter und Wattmeter benutzt. Der Zeiger des Meßinstruments trägt hierbei eine kleine Füllfeder und zeichnet auf einem Papierstreifen, der von einem Uhrwerk vorwärts bewegt wird, den Verlauf der Spannung usw. auf.

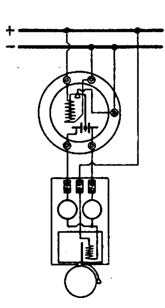


Abb. 94. Kontakt-Voltmesser.

c) Signalapparate. Zur selbsttätigen Regelung der Spannung werden Regulierwiderstände und Drehtransformatoren indirekt mit Hilfe von Zwischenrelais durch Kontaktvoltmeter gesteuert. Auch können diese zur Betätigung optischer oder akustischer Signale für die Anzeige zu niedriger und zu hoher Spannung benutzt werden. Die schwingenden Teile der Kontaktvoltmeter müssen erhebliche Trägheit und gute Dämpfung besitzen.

Die Schaltung eines solchen Kontaktvoltmeters der Firma Dr. Paul Meyer A.-G. ist aus dem Schema Abb. 94 ersichtlich. In einer an die Leitungsanlage angeschlossenen Magnetspule schwingt ein Anker, der an dem einen Ende eines Hebels befestigt ist. Das andere Ende ist als Kontaktarm ausgebildet und liegt zwischen zwei Kontakten, an die zwei verschiedenfarbige Glühlampen und im weiteren Verlaufe ein Wecker angeschlossen sind. Der Drehpunkt des Hebels ist mit dem Minuspole und die Endklemme des Weckers mit dem Pluspole des Netzes verbunden. Bei zu hoher oder zu tiefer Spannung legt sich der Kontaktarm an den rechten bzw. linken Kontakt und betätigt hierdurch die betr. Signallampe und den Wecker.

Messungen an Erdleitungen.

(255) Die Messungen können entweder mit Hilfe gleichgerichteter Ströme oder mit Wechselströmen vorgenommen werden. Wegen der polarisierenden Wirkung der Erdplatten bei Anwendung gleichgerichteter Ströme ist die Messung mit Wechselstrom vorteilhafter. Verwendet man Gleichstrom, so nimmt man zweckmäßig eine starke Batterie, führt jede Messung mit beiden Stromrichtungen aus und nimmt das arithmetische Mittel.

(256) Methoden von Schwendler und Ayrton. Je 7 bis 10 m weit von der zu untersuchenden Erdplatte entfernt werden 2 andere Platten in die Erde eingegraben. Von je zweien dieser Platten wird der Gesamtwiderstand R gemessen; die Einzelwiderstände seien P_1, P_2, P_3.

Aus $$R_{12} = P_1 + P_2;\quad R_{13} = P_1 + P_3;\quad R_{23} = P_2 + P_3,$$

und $$R_{12} + R_{13} + R_{23} = S,$$

ergibt sich $$P_1 = \frac{S}{2} - R_{23};\quad P_2 = \frac{S}{2} - R_{13};\quad P_3 = \frac{S}{2} - R_{12}.$$

Diese Messungen lassen sich nach einer ähnlichen Anordnung sehr bequem mit besonderen tragbaren Meßeinrichtungen, Telephonbrücken genannt, von Hartmann und Braun, Mix und Genest u. a. ausführen. Die Einrichtungen enthalten eine vollständige Wheatstonesche Brücke, Induktionsapparat nebst Trockenelementen und Telephon.

Die kleine Telephonbrücke von Siemens & Halske (ETZ 1893, S. 478) benutzt keinen Wechselstrom, sondern unterbrochenen Gleichstrom, der mit Hilfe eines Kontakträdchens erzeugt wird; das letztere wird bewegt, so lange die Kurbel gedreht wird, mit der man den Kontakt an dem ausgespannten Draht verschiebt; so lange die Kurbel ruht, hört man demnach kein Geräuch im Telephon.

(257) Methode von Nippoldt. Man legt in der Nähe, aber in mindestens 10 m Entfernung von der zu prüfenden Erdleitung wagrecht in das Grundwasser eine Hilfsplatte und ermittelt die Summe R_1 der Widerstände beider Erdleitungen. Darauf ersetzt man die Hilfsplatte durch eine kleinere von beiläufig halb so großen Abmessungen und mißt abermals die Summe R_2 der beiden Widerstände. Hat der benutzte Leitungsdraht den Widerstand r (meist zu vernachlässigen), und ist das Verhältnis des Ausbreitungswiderstandes der kleineren zu dem der größeren Platte $= v$, welches ein- für allemal bestimmt werden muß, so ist der gesuchte Widerstand

$$P = \frac{R_1 v - R_2}{v - 1} - r.$$

(258) Methode von Wiechert (ETZ 1893, S. 726). Abb. 95. Die zu messende Erdleitung sei x; eine zweite Erdleitung y sei entweder vorhanden oder werde für die Messung hergestellt. An einer anderen Stelle wird in eine gut angefeuchtete Stelle des Erdreichs ein starker Eisendraht eingetrieben, an dem man oben eine Leitung befestigt. S ist eine Wechselstromquelle, AB der ausgespannte Draht oder dergl. einer Wheatstoneschen Brückenanordnung. Der Umschalter u wird einmal links, einmal rechts gestellt und die Stellungen des Kontaktes abgelesen.

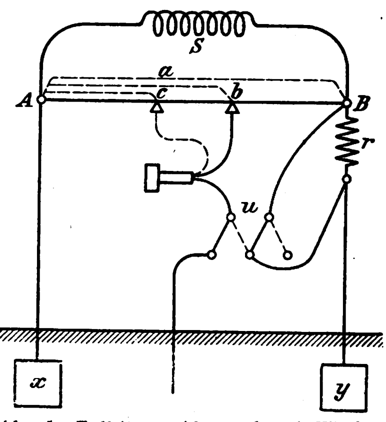


Abb. 95. Erdleitungswiderstand nach Wiechert.

Bei der von Wiechert angegebenen Anordnung fehlen dem Umschalter u die beiden Kontakte rechts. Es ergibt sich

$$x = r \cdot \frac{b}{a - c}, \quad y = r \cdot \frac{c - b}{a - c}.$$

Wenn man an der Teilung von AB das Verhältnis der verglichenen Widerstände ablesen kann, und wenn die Ablesungen A_l und A_r für Umschalter u links und rechts sind, so ist:

$$x = r \cdot A_l \frac{A_r + 1}{A_l + 1}, \qquad y = r \cdot \frac{A_r - A_l}{A_l - 1}$$

Bei der Anordnung der Abb. 95 ist

$$x = r \cdot \frac{c}{a - c} \cdot \frac{b}{a}, \qquad y = r \cdot \frac{c}{a - c} \cdot \frac{a - b}{a} = x \cdot \frac{a - b}{b} \quad \text{und}$$

$$x = r \cdot A_r \cdot \frac{A_l}{A_l + 1}, \qquad y = r \cdot \frac{A_r}{A_l + 1} = x \cdot A_l$$

r macht man in der Regel $= 10\,\Omega$.

Die Methode ist sehr empfehlenswert.

Tragbare Apparate in Form der Telephonmeßbrücke werden von Hartmann & Braun gebaut.

Verbrauchsmessung.

(259) Elektrizitätszähler messen die in einem Stromkreis oder Stromsystem verbrauchte elektrische Arbeit; ihre Angaben werden benutzt, um die Vergütung für die von einer Zentrale an einen Abnehmer abgegebene elektrische Energie zu berechnen.

Je nach der Einheit, in der die Zähler ihre Angaben machen, unterscheidet man (Kilo-)Wattstundenzähler, Amperestundenzähler und Zeitzähler.

Ist N die konstante Leistung, die in einem Stromsystem verbraucht wird, t die Zeit, während deren sie verbraucht wird, so mißt der Wattstundenzähler die Größe Nt, und zwar in Wattstunden bzw. Kilowattstunden. Diese Zähler besitzen Spannungskreise und Hauptstromkreise, die je nach Art des Stromsystems wie die Leistungsmesser geschaltet werden (198).

Ist die Betriebsspannung konstant, so ist die Leistung bei Gleichstrom proportional der Stromstärke; für diesen Fall genügt also ein Amperestundenzähler, der somit nur einen Hauptstromkreis, keinen Spannungskreis besitzt. Seine Angaben multipliziert mit der Betriebsspannung ergeben die gesuchten Wattstunden. Es ist gesetzlich zulässig, daß die Ablesungen eines Amperestundenzählers auch direkt in Wattstunden erfolgen, sofern auf dem Zähler sich der Vermerk findet, bei welcher Betriebsspannung er gebraucht werden darf.

Ist an einen Stromkreis von konstanter Spannung eine konstante Belastung angeschlossen, so ist auch die beim Einschalten abgegebene Leistung konstant; es genügt daher, lediglich die Zeit der Einschaltdauer mittels einer geeigneten Uhr zu messen. Dies geschieht durch die Zeitzähler.

Um eine Übervorteilung der Zentrale auszuschließen, werden vielfach Strombegrenzer in Verbindung mit Zeitzählern angewandt. Wird eine größere Stromstärke eingeschaltet, als ausbedungen, so tritt ein in kurzen Intervallen arbeitender periodischer Ausschalter in Tätigkeit (ETZ 1910, S. 51).

Man kann folgende Anforderungen an einen Elektrizitätszähler stellen:

Seine Angaben müssen in den gesetzlichen Einheiten erfolgen, dürfen gewisse Verkehrsfehlergrenzen nicht überschreiten (267) und sollen sich mit der Zeit möglichst wenig ändern; er soll möglichst unempfindlich sein gegen Änderungen der Temperatur und Feuchtigkeit, gegen Kurzschlüsse, Staub, Stöße und Erschütterungen; er soll einen möglichst lautlosen Gang haben, verschließbar, plombierbar und leicht transportabel sein, dabei verhältnismäßig kleine Abmessungen und geringen Eigenverbrauch haben.

(260) Elektrolytische Zähler benutzen zur Verbrauchsmessung die aus einem Elektrolyt durch den Strom niedergeschlagene Metallmenge; sie sind also Amperestundenzähler und nur für Gleichstrom brauchbar.

Ein modernen Ansprüchen angepaßter elektrolytischer Zähler ist der Stiazähler der Firma Schott u. Gen. in Jena (ETZ 1909, S. 784 u. 976, 1910, S. 624, 980; 1914, S. 739). Die Anode wird durch eine ringförmige Quecksilberrinne gebildet, welche einen als Kathode dienenden Kegel aus Iridium umschließt. Als Elektrolyt dient eine Lösung von Jodquecksilber und Jodkalium in Wasser. Das von der Kathode abtropfende Quecksilber wird in einer geteilten Röhre aufgefangen. Das den Zähler enthaltende Glasgefäß ist vollständig zugeschmolzen.

Ist das geteilte Rohr nahezu vollgelaufen, so muß das Quecksilber durch Kippen in den Speiser und die Quecksilberrinne zurückgebracht werden. Für größere Stromstärken wird der Zähler in den Nebenschluß zu einem geeigneten Widerstand gelegt. Dabei wird vor das Zersetzungsrohr ein Widerstand geschaltet, der teils aus Manganin, teils aus Reinnickeldraht besteht; letzterer um den negativen Temperaturkoeffizienten des Elektrolyts zu kompensieren.

Zur Eichung dient die Formel:

$$m\left(1 + \frac{r}{R}\right) = 3{,}726\,Q \cdot$$

Darin bedeutet

m Gewicht des Quecksilbers von dem bis zum obersten Skalenstrich gefüllten Meßrohr in g,

Q Zahl der Amperestunden, welche dem obersten Skalenteil entspricht,

R Abzweigwiderstand,

r Widerstand des Elektrolyts und Vorschaltwiderstand.

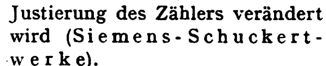
(261) Pendelzähler (Aron). Die Wirksamkeit der Pendelzähler besteht darin, daß die Schwingungsdauer eines Pendels durch die elektromagnetischen oder elektrodynamischen Kräfte des Arbeitsstromes verändert wird.

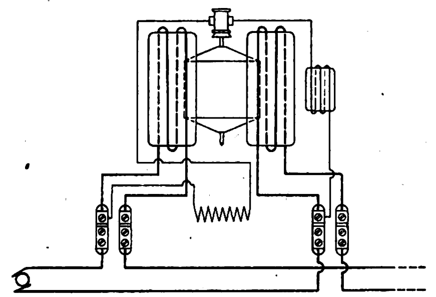
Zwei einander gleiche und genau gleichgehende Uhren arbeiten mittels des sogenannten Planetenrades auf ein Differentialzeigerwerk, das somit die Gangdifferenz der beiden Uhren anzeigt. Das eine Pendel trägt eine dünndrähtige Spule mit horizontal liegender Windungsfläche, die unter Zwischenschaltung eines geeigneten Vorschaltwiderstandes an die Betriebsspannung angeschlossen wird (Spannungskreis). Unterhalb der Spannungsspule liegt mit paralleler Windungsebene die Hauptstromspule, so daß sie bei Stromdurchgang den Gang des einen Pendels beschleunigt, des anderen verzögert. Die Gangdifferenz ist proportional dem Verbrauch. Wird die Spannungsspule durch einen permanenten Magnet ersetzt, so erhält man einen Amperestundenzähler.

Während man bei den älteren Zählern nur lange Pendel verwandte, werden jetzt fast ausschließlich nur noch Kurzpendelzähler gebaut (ETZ 1897, S. 372). Bei diesen sind die Pendel so kurz, daß sie nach dem Aufziehen der Uhrwerke von selbst in Schwingungen kommen; das Aufziehen wird automatisch auf elektromagnetischem Wege besorgt. Eine etwas komplizierte Umschaltvorrichtung verhindert selbst bei schlechter Einregulierung der Pendel den Leerlauf. Da der Zähler auf dem dynamometrischen Prinzip beruht, so ist er für Gleichstrom und Wechselstrom brauchbar, und zwar ist er für Ein- und Mehrleitersysteme, Ein- und Mehrphasenstrom ausgebildet. Zuweilen macht sich die Hautwirkung der Hauptstromspulen bemerklich. Daher müssen die für Wechselstrom bestimmten Zähler auch mit Wechselstrom geeicht werden. Bei Wechselstrom werden für höhere Spannungen und große Stromstärken Spannungs- und Stromwandler angewandt (208 b).

(262) Motorzähler. 1. Elektrodynamische und elektromagnetische Motorzähler. Die Wattstundenzähler dieser Klasse (Abb. 96), die sog. Thomsonzähler, bestehen aus einer oder mehreren einander parallel gestellten Hauptstromspulen, die das Feld für den Anker bilden; der Anker bildet zusammen mit einem geeigneten Vorschaltwiderstand den Spannungskreis. Das den Anker antreibende Drehmoment ist daher proportional $E\,I$. Auf der Ankerachse sitzt eine Aluminium- oder Kupferscheibe, die sich zwischen den Polen eines permanenten Magnetes dreht (in der Abb. nicht gezeichnet); das dadurch hervorgerufene bremsende Drehmoment ist der Drehungsgeschwindigkeit proportional. Werden im stationären Zustand antreibendes und bremsendes Drehmoment einander gleich, so ist die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers proportional der Leistung, d. h. ein mit der Ankerachse verbundenes Zählwerk gibt bei geeigneter Übersetzung der Räder den Energieverbrauch an.

Dabei ist aber die Reibung in Lager, Bürsten und Zählwerk unberücksichtigt geblieben. Um diese Reibung zu kompensieren, ist in den Spannungskreis eine feststehende Spule eingeschaltet, welche so angeordnet ist, daß sie die Wirksamkeit der Hauptstromspulen unterstützt; es wird also auch bei stromloser Hauptstromspule ein Drehmoment auf den Anker ausgeübt, das die Reibung kompensieren soll. Damit nun dieses, namentlich bei Spannungssteigerungen, nicht imstande ist, Leerlauf des Zählers zu verursachen, wird eine Hemmvorrichtung angebracht. Diese besteht z. B. in einem an der Drehachse befestigten Eisenstift, der von dem Bremsmagnete beim Vorübergehen festgehalten wird.

Ein die Betriebsicherheit des Zählers gefährdender Teil ist der Kollektor des Ankers; damit die Bürstenreibung möglichst gering und gleichförmig wird, macht man den Kollektordurchmesser möglichst klein und sorgt dafür, daß die Bürsten leicht mit gleichmäßiger Federung aufliegen. Kollektorlamellen und Bürsten werden am besten aus Silber oder Gold hergestellt. Neuerdings werden von einigen Firmen Bürsten und Kollektor durch besondere Öffnungen der Zählerklappe leicht zugänglich gemacht; oder auch sie können ausgewechselt werden, ohne daß die 
Justierung des Zählers verändert wird (Siemens-Schuckertwerke).


Abb. 96. Motorwattstundenzähler mit Kollektor.

Die Zähler können durch fremde Magnetfelder, z. B. durch diejenigen benachbarter Starkstromleitungen in ihren Angaben beeinflußt werden. Deswegen ist auch, namentlich bei Zählern für große Stromstärken, genau die Lage der Hauptstromzuleitungen vorzuschreiben und die Nähe starker fremder Ströme nach Möglichkeit zu vermeiden. Um diesen Einfluß zu kompensieren, werden Zähler mit astatischem Anker konstruiert, das sind zwei einander gleiche Anker, die auf derselben Achse übereinander sitzen und vom Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden; die eine Ankerwicklung befindet sich im Hauptstromfeld, die andere außerhalb des letzteren.

Magnetmotorzähler. Das Feld dieser Zähler wird von einem kräftigen Dauermagnete gebildet. Der Anker liegt im Nebenschluß zu einem im Arbeitsstromkreis eingeschalteten Widerstand; die Spannung an den Ankerklemmen ist also proportional der Hauptstromstärke, beträgt aber nur Bruchteile eines Volt. Die Zähler haben keinen Spannungskreis, sind also Amperestundenzähler. Da die Spannung am Kollektor sehr gering ist, bringen Übergangswiderstände an den Bürsten leicht Störungen hervor. Um diesen Mißstand zu beseitigen, verwendet die AEG bewegliche Bürsten, die sich je nach der Stromstärke an verschiedene Stellen des Kollektors anlegen (ETZ 1908, S. 608; 1914, S. 997).

Quecksilbermotorzähler. In einer mit Quecksilber gefüllten flachen Dose schwimmt eine Kupferscheibe, die bis auf eine Stelle im Mittelpunkt und den Scheibenrand emailliert ist. Die Scheibe befindet sich zwischen den Polen von permanenten Magneten, die die Dose umfassen. Der Arbeitsstrom wird der Mitte der Scheibe zugeführt, fließt zwischen den Magnetpolen durch und verläßt sie am Rande. Die Kraft des Magnetfeldes auf den Strom versetzt die Scheibe in Umdrehungen, die auf ein Zählwerk in der üblichen Weise übertragen werden. Da andrerseits die Magnete auch bremsend auf die Scheibe wirken, so erhält man einen gebremsten Amperestundenzähler, der keinen Kollektor besitzt. Die Reibung des Quecksilbers wird durch Zusatzspulen, die auf den permanenten Magneten an-

gebracht sind, kompensiert. Dieser Typ besitzt eine sehr große Anlaufsempfindlichkeit. Für größere Stromstärken wird er mit Nebenschlußwiderstand gebraucht. Zähler ohne Nebenschluß haben einen großen Temperaturkoeffizienten (0,4% für 1° C); mit Nebenschluß ist die Abhängigkeit von der Temperatur kleiner. (Deutsche Ferranti-Gesellschaft; Solar-Zählerwerke Hamburg. Isariawerke, ETZ 1911, S. 684; 1913, S. 1234; 1914, S. 64).

Oszillierende Zähler (Abb. 97) sind gebaut worden, um den Kollektor der Motorzähler unnötig zu machen. Bei dem von der AEG ausgeführten Modell besteht die Spannungsspule aus zwei nebeneinander liegenden, einander gleichen Wicklungen und ist drehbar zwischen zwei Hauptstromspulen angeordnet. Die Drehung wird durch zwei Anschläge begrenzt, bei deren Berührung ein Relais eingeschaltet wird; dieses Relais bewirkt, daß immer nur eine Hälfte der beiden Spannungswicklungen vom Strom durchflossen wird, wobei die Stromrichtungen, die in den beiden Hälften fließen können, einander entgegengesetzt gerichtet sind. Die Folge davon ist, daß im Moment des Anschlages die Kraftrichtung umgekehrt wird, so daß eine oszillierende Bewegung zustande kommt. Bremsung und Reibungskompensation erfolgt ebenso wie bei Motorzählern. Die Abb. 97 zeigt die Schaltung des größeren Zählertyps der AEG (ETZ 1913, S. 852).

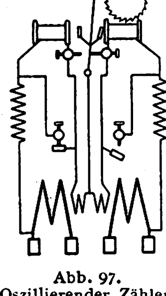


Abb. 97. Oszillierender Zähler.

Abb. 98. Diagramm für Drehfeldmeßgeräte.

(263) 2. Induktionsmotorzähler. Induktionszähler sind Motorzähler für Wechselstrom; der Anker besteht aus einem Metallzylinder oder einer Metallscheibe, in der Wirbelströme induziert werden; die Zähler brauchen somit keine Stromzuführungen zum beweglichen System, wodurch ihre Zuverlässigkeit gegenüber den Gleichstromzählern mit Kollektoren bedeutend erhöht wird. Die Wirksamkeit der Induktionszähler beruht auf folgendem Satz: Ein Metallzylinder werde in zwei magnetische Wechselfelder gebracht, die radial und aufeinander senkrecht gestellt sind. Sind dann $\mathfrak{B}_1$ und $\mathfrak{B}_2$ die Effektivwerte der Felder, δ ihre Phasenverschiebung, so wird auf den Metallzylinder ein Drehmoment proportional $\mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \sin \delta$ ausgeübt.

Bei den Induktionszählern wird nun das eine Feld in der Regel durch eine in die Hauptstromleitung eingeschaltete Spule erzeugt; es ist also seiner Größe nach proportional dem Hauptstrom und besitzt dieselbe Phase wie dieser. Um einen Wattstundenzähler zu erhalten, muß man das zweite Feld proportional der Höhe der Spannung machen und in der Phase um 90° gegen die Spannung verschieben. Bedeutet φ die Phasenverschiebung zwschen E und I, so wird das Drehmoment, wie das Diagramm (Abb. 98) zeigt, proportional $\mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \sin \delta$, d. h. proportional $E\,I \cos \varphi$. Über 90°-Schaltungen s. Brückmann Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911, S. 981. Waltz, ETZ 1905, S. 230, 254, 273. Schmiedel, Arch. f. El. Bd. 2. S. 275. Siegbahn, ETZ 1914, S. 206.

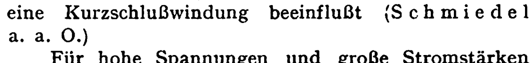
Von den mannigfachen Methoden, die zur Erzeugung der Verschiebung von 90° angegeben worden sind, ist in der Praxis nur die Methode von Belfield mit ihren Abarten übrig geblieben. Wird eine Wechselspannung, unter Vorschaltung einer Drosselspule, an eine Spule angeschlossen, deren Eisenkern das Spannungsfeld erzeugen soll, so wird infolge der Energieverluste in den Spulen das Spannungsfeld nur etwa bis zu 70° gegen die Spannung verschoben.

Bringt man nun auf das Eisen dicht an dem Zähleranker eine Kurzschlußwindung auf, so entstehen in dieser Ströme, die ein Streufeld erzeugen. Durch

geeignete Abmessungen der Kurzschlußwindungen und deren Lage auf dem Eisenkern kann man es dahin bringen, daß die Resultierende aus ursprünglich vorhandenem Feld und Feld der Kurzschlußwindung um 90° gegen die Betriebsspannung verschoben ist. Macht man die Ankerscheibe dick genug, so kann sie die Kurzschlußwindung ersetzen. Man wählt in diesem Falle die Abmessungen häufig so, daß der Phasenwinkel zwischen Spannung und Spannungsfeld größer als 90° wird und fügt in den Spannungskreis einen Widerstand ein, um diesen Winkel auf einen Rechten zu bringen.

Wird die Kurzschlußwindung mit der Primärwicklung verbunden, so entsteht die Schaltung der Abb. 99, die von den Siemens-Schuckertwerken angewandt wird.

Zu vorteilhaften Schaltungen gelangt man, indem zum wirksamen Magnetflusse einen magnetischen Nebenschluß legt und einen der Zweige durch



eine Kurzschlußwindung beeinflußt (Schmiedel a. a. O.)

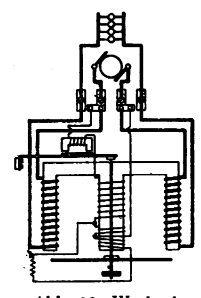


Abb. 99. Wechselstromzähler der S.-S.-W.

Für hohe Spannungen und große Stromstärken werden die Induktionszähler gewöhnlich in Verbindung mit Meßwandlern (208b) gebraucht; die sekundäre Spannung der Spannungswandler beträgt in der Regel 120 V, die sekundäre Nennstromstärke der Stromwandler 5 A. Sind die Meßwandler groß genug, so pflegt man an dieselben gleichzeitig Spannungs-, Strom- und Leistungsmesser anzuschließen. Werden keine sogenannten Präzisionswandler angewandt, so müssen die Fehler der Meßwandler durch geeignete Eichung der Zähler kompensiert werden. In diesem Falle macht der Zähler nur in Verbindung mit dem Apparate-Aggregat, mit dem er zusammen geeicht worden ist, richtige Angaben.

(264) Drehstromzähler. Zur Messung von Drehstromenergie wird in der Regel die Aronsche Schaltung (198) angewandt. Man läßt zwei einander gleiche in der erwähnten Weise geschaltete Stromsysteme auf dieselbe Motorscheibe wirken. Dabei muß nach Möglichkeit vermieden werden, daß die Stromspule des einen Systems und das Spannungsfeld des anderen zusammen ein Drehmoment zustande bringen, oder umgekehrt. Noch schwieriger ist diese Bedingung bei Zählern für Drehstrom mit Nulleiter zu erfüllen, die mit drei Stromsystemen gebaut werden. Man pflegt in diesem Fall zwei Scheiben anzuwenden, von denen die eine von zwei Stromsystemen, die andere vom dritten Stromsystem und dem Bremsmagnet beeinflußt wird.

Darf bei Drehstrom eine gleichmäßige Belastung in allen drei Zweigen vorausgesetzt werden, so können vereinfachte Schaltungen angewandt werden. Zu empfehlen sind diese Apparate aber nicht, weil die theoretischen Voraussetzungen, unter denen sie gebaut werden, in der Praxis fast nie zutreffen (vgl. ETZ 1913, S. 53).

Über Zähler, welche nach einem um so höheren Tarif registrieren, je stärker induktiv die Belastung wird (komplexe Belastung) ETZ 1915, S. 505; 1918, S. 93, 105; 1919 S. 101, 115; 1920 S. 314.

(265) Zähler für besondere Tarife. a) Höchstverbrauchmesser. Für eine Zentrale ist ein möglichst gleichmäßiger Verbrauch vorteilhafter als ein starker Verbrauch während einer kurzen Zeit. Dementsprechend werden die einen Abnehmer gegenüber den anderen ungünstiger tarifiert. Zu dem Zwecke wird neben den Zähler ein Apparat gehängt, der den in einer gewissen Zeit erreichten maximalen Strom anzeigt. Ein derartiger Höchstverbrauchmesser ist z. B. von Wright konstruiert worden; er besteht in einer U-förmigen Röhre mit zwei Erweiterungen an den Enden; der untere Teil der Röhre ist mit einer schwach gefärbten Flüssigkeit gefüllt. Ein in den Hauptstromkreis geschalteter Widerstandsdraht ist um die

eine Erweiterung gewickelt, an die andere ist ein Überfallrohr geschmolzen, das eine Teilung trägt. Das Ganze wirkt wie ein Luftthermometer, die in dem Überfallrohr angesammelte Flüssigkeit ist ein Maß für den Höchstverbrauch. Durch Umkippen des ganzen Apparates wird er zu einer neuen Angabe gebrauchsfertig.

Empfehlenswerter ist folgende Einrichtung. Es wird 15 Minuten lang ein besonderes Zählwerk mit der Zählerachse gekuppelt; das Zählwerk schiebt einen Zeiger um einen dem Verbrauch in dieser Zeit proportionalen Betrag vorwärts. Das Zählwerk wird am Ende der 15 Minuten momentan in seine Anfangslage zurückgebracht, während der Zeiger in der Endlage, die er erreicht hat, stehen bleibt. Steigt nun in den nächsten 15 Minuten der Gesamtverbrauch, so wird am Ende dieser Periode der Zeiger noch um ein entsprechendes Stück vorwärts geschoben. Der Zeiger gibt also den höchsten Verbrauch an, der in irgendeinem Zeitraum von 15 Minuten vom Abnehmer entnommen worden ist.

b) Doppeltarifzähler. Eine andere Methode besteht darin, daß der Zähler zwei Zählwerke bekommt, die abwechselnd eingeschaltet werden, so daß z. B. des Nachts das eine, am Tage das andere Zählwerk den Verbrauch anzeigt. Die Ablesungen an den beiden Zifferblättern werden dann ungleich tarifiert. Eine Uhr besorgt das Umschalten der Zählwerke selbsttätig zu bestimmten einstellbaren Stunden, oder es wird von der Zentrale aus durch ein besonderes Leitungsnetz bewerkstelligt.

c) Spitzenzähler. Der Zähler enthält ein Planetenrad; das eine Antriebsrad des Zählers ist mit dem Zähleranker gekuppelt, das andere mit einem gleichmäßig laufenden Uhrwerk. Das Planetenrad, das sich mit der Differenz der Geschwindigkeiten der Antriebsräder dreht, wird durch eine Sperrklinke verhindert, rückwärts zu laufen. Ein mit ihm verbundenes Zählwerk, das Spitzenzählwerk, schreitet also nur dann vorwärts, wenn die Leistung über einen gewissen Wert hinaus steigt, und zählt dann die bei dieser Leistung verbrauchte Energiemenge. Außer dem Spitzenzählwerk besitzt der Zähler natürlich noch ein gewöhnliches den Gesamtverbrauch anzeigendes. Der vom Spitzenzählwerk angezeigte Verbrauch muß vom Abnehmer besonders vergütet werden (ETZ 1914, S. 330).

(266) Elektrizitäts-Selbstverkäufer. Nach Einwurf eines Geldstückes steht dem Abnehmer die Betriebsspannung zur Verfügung; nach Entnahme einer gewissen durch den Zähler gemessenen Energiemenge wird der Strom selbsttätig wieder abgeschnitten. Es können mehrere Geldstücke im voraus eingeworfen werden (ETZ 1911, S. 895).

(267) Prüfung von Elektrizitätszählern. Um einen Zähler im Laboratorium auf seine Richtigkeit zu prüfen, ist es nicht notwendig, die von ihm registrierte Arbeit wirklich zu verbrauchen. Vielmehr wird man durch Trennung der Stromkreise im Zähler den Apparat künstlich belasten. Man verfährt dabei in derselben Weise wie bei der Prüfung von Leistungsmessern (212, 213). Sollen die Fehler festgestellt werden, die ein Zähler an einem bestimmten Verwendungsort macht, so muß man die Prüfung an Ort und Stelle vornehmen, um alle etwaigen störenden Einflüsse, die dort auftreten, berücksichtigen und den Apparat unter den Betriebs- und Belastungsverhältnissen prüfen zu können, unter denen er wirklich gebraucht wird. Um die zur Prüfung notwendigen Apparate einbauen zu können, ist es bequem, wenn der Zähler mit sog. Prüfklemmen versehen ist.

Die Abweichung eines Zählers von der Richtigkeit wird entweder angegeben durch den prozentischen Fehler F, gemessen in Prozenten der Sollangabe, oder durch die Zählerkonstante C. Unter letzterer versteht man diejenige Zahl, mit der die Angaben des Zählers multipliziert werden müssen, um den tatsächlichen Verbrauch zu ergeben. F und C hängen durch die Gleichung

$$F = 100 \cdot \frac{1 - C}{C}$$

zusammen, wenn der Sollwert der Konstante 1 ist. Z. B. $C=1{,}08$, $F=-7{,}4\%$ (Zähler läuft 7,4 % zu langsam). F und C können sich mit der Belastung des Zählers ziemlich beträchtlich ändern.

Zur Bestimmung von F ist außer der Leistung N (in Watt) die Zeit zu messen, während deren das Zählwerk um einen bestimmten Betrag vorwärts rückt. Die Zeitmessung erfolgt durch geeignete Uhren oder Chronographen (ETZ 1900, S. 1035; 1901, S. 94). Bei Motorzählern ist es vorteilhaft, die Zeit t (in s) zu messen, während deren die Motorscheibe n Umdrehungen macht. Trägt der Zähler die Angabe, daß 1 kWh n Umdr. entspricht, so berechnet sich C aus:

$$C = \frac{N t u}{3600 \cdot 1000 \cdot n}.$$

Über das Verhalten bei schwankender Belastung s. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1909, S. 801 und 1911, S. 555.

Über die Methoden zur Messung von Luft-, Lager- und Zählwerksreibung s. Schmiedel, Verh. des Ver. z. Bef. d. Gewerbfl. 1910, S. 571, 655 u. 1911, S. 111.

Über Zählerprüfeinrichtungen s. Kraus, Elektrotechn. u. Maschinenb. 1908, S. 271.

(268) Gesetzliche Bestimmungen über Elektrizitätszähler. Für die Messung elektrischer Energie durch Zähler zum Zweck der Vergütung ist das Gesetz betr. die elektrischen Maßeinheiten vom 1. 6. 1898 maßgebend; namentlich sind die §§ 6, 9, 12 von Wichtigkeit. Zu diesem Gesetz hat der Bundesrat Ausführungsbestimmungen erlassen, durch welche die im Verkehr zulässigen Fehler für Elektrizitätszähler festgesetzt worden sind (Verkehrsfehlergrenzen).

Diese Bestimmungen lassen sich folgendermaßen in Formeln ausdrücken. Für eine Belastung, die gleich $1/n$ der Maximalbelastung ist, ist die zulässige Verkehrsfehlergrenze bei Gleichstromzählern gleich $\pm\,(6+0{,}6\cdot n)$ Prozent, bei Wechselstromzählern $\pm\,(6+0{,}6\,n+2\,\mathrm{tg}\,\varphi)$ Prozent, wo φ die Phasenverschiebung bedeutet.

Amtliche Prüfung und Beglaubigung. Zähler können einer amtlichen Prüfung und Beglaubigung unterworfen werden. Hierzu sind berechtigt die Physikalisch-Technische Reichsanstalt und die elektrischen Prüfämter: 1. in Ilmenau, 2. in Hamburg, 3. in München, 4. in Nürnberg, 5. in Chemnitz, 6. in Frankfurt a. M., 7. in Bremen.

Durch die Beglaubigung eines Zählers soll ausgedrückt werden, daß ein Zähler die sogenannten „Beglaubigungsfehlergrenzen" einhält, die im großen und ganzen halb so groß sind wie die Verkehrsfehlergrenzen, und daß vermöge seiner Konstruktion und der im praktischen Betriebe gesammelten Erfahrungen zu erwarten steht, daß der Apparat auch für längere Zeit (ca. 2 Jahre) bei sachgemäßer Behandlung diese engeren Fehlergrenzen nicht überschreitet. Ein Zähler kann nur beglaubigt werden, wenn sein System nach eingehender Systemprüfung durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zu einem beglaubigungsfähigen erklärt worden ist (vgl. Prüfordnung für elektrische Meßgeräte).

In den Leitsätzen für die Beglaubigung (ETZ 1914, S. 601) ist als zulässiger Fehler

$$\left[3+0{,}3\frac{N_N}{N}+\left(1+0{,}2\frac{I_N}{I}\right)\mathrm{tg}\,\varphi\right]\%$$

angegeben.

Über zur Beglaubigung zugelassene Systeme vgl. die Bekanntmachungen in der ETZ, als Sonderabdrücke erschienen bei Springer.

Literatur: Königswerther, Elektrizitätszähler, Leipzig 1914. — Ziegenberg, Elektrizitätszähler (Handbuch der Elektrotechnik Bd. 6, 2. Hirzel, Leipzig 1908). —

Norden, Elektrolytische Zähler. Wilh. Knapp, Halle 1908. — E. Morck, Theorie der Wechselstromzähler nach Ferrarisschem Prinzip und deren Prüfung an ausgeführten Apparaten. Ferd. Enke, Stuttgart 1905. — Bohnenstengel, Elektrizitätszähler-Konstruktionen. Karlsruhe 1909. — Schmiedel, Motorelektrizitätszähler, Stuttgart 1916. — Möllinger, Motorzähler und Meßwandler, Berlin, 1917. — Lubach ETZ 1914. S. 753. — Krukowski, Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers Berlin, 1920.

Messungen an Sammlern (Akkumulatoren).

Allgemeines. Bei den Messungen ist darauf zu achten, daß der innere Widerstand sehr klein ist, und daß man deshalb einen starken Strom erhält, wenn man den Sammler durch einen geringen Widerstand schließt.

(269) Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung unterscheiden sich um das Produkt des inneren Widerstandes R mit den Stromstärken I. Während der Entladung ist $E = P + RI$, während der Ladung $= P - RI$. Mißt man bei stromloser Batterie, so erhält man die EMK; liefert die Batterie Strom oder wird sie geladen, so erhält man die Klemmenspannung, aus der man die EMK berechnen kann.

A. Messung bei stromloser Batterie. a) mit dem Elektrometer. Schaltung s. (152). Es wird zuerst die Ablenkung gemessen, die ein Normalelement von bekannter EMK (162 u. f.) hervorbringt, und dann diejenige, welche das zu untersuchende Element erzeugt. Die EM-Kräfte verhalten sich wie die Ablenkungen.

b) mit dem Kondensator. Man lädt einen Glimmerkondensator mit dem zu untersuchenden Element und entlädt den Kondensator durch ein Galvanometer (179); ebenso verfährt man mit dem Normalelement. Die EMKräfte verhalten sich wie die Ablenkungen.

c) Kompensationsmethoden, vgl. (180) bis (182).

B. Messung bei stromliefernder oder -aufnehmender Batterie. Man verwendet direkt zeigende Apparate nach (178b).

(270) Widerstand. Der Einfluß des inneren Widerstandes auf die Spannung wird im allgemeinen von dem der Polarisation übertroffen. Aus letzterem Grunde versagen auch die meisten der für Primärelemente angegebenen Meßmethoden. Man berechnet ihn genau genug aus der zwischen den Platten befindlichen Säure (Widerstand von 1 cm³ Akkumulatorensäure etwa 1,4 Ω), wobei man zur Berücksichtigung der übrigen Widerstände für das geladene Element etwa 50%, für das entladene 100 bis 150% aufschlägt.

Zur genauen Messung dient für den stromlosen Akkumulator die Methode von Kohlrausch (175). Erforderlich sind: ein kleines Induktorium, ein Telephon und eine induktionsfreie Wheatstonesche Brücke mit gerade ausgespanntem Draht. Zur Vermeidung von Entladeströmen schaltet man zwei Akkumulatoren gegeneinander und mißt den Gesamtwiderstand, oder man fügt in die einzelnen Stromkreise Kondensatoren ein, die den Wechselstrom durchlassen, den Gleichstrom sperren.

Methoden zur Messung des inneren Widerstandes während der Ladung und Entladung haben Boccali, Uppenborn, Frölich (ETZ 1891) sowie Nernst und Haagn angegeben, von denen besonders die letztere in der Ausführung von Dolezalek und Gahl einwandsfreie Resultate liefert. (Zeitschr. f. Elektrochemie 1900.) Durch Einschalten von Kondensatoren in die Wheatstonesche Brücke vermeidet man, daß das zu messende Element Strom liefert (Abb. 100). $R_1 R_2$ ist ein ausgespannter Widerstandsdraht. Es ist darauf zu achten, daß R_1 gegen R_2 klein sei; andernfalls ist R_2 durch Zuschalten eines bekannten Widerstandes zu vergrößern.

Es ist $R = \frac{C_2}{C_1} \cdot R_2 - R_1$. Zur Eichung der Aufstellung schaltet man an Stelle von R bekannte induktionsfreie Widerstände. Diese Methode ist zur Messung des Widerstandes von Sammlerelementen geeignet. Auch durch Gegeneinanderschaltung

zweier gleicher Elemente verhindert man das Zustandekommen eines merklichen Stromes. Die Vergleichswiderstände der Brücke sind hier durch Kondensatoren ersetzt. In Abb. 100 ist der Akkumulator allein gezeichnet; legt man die Ladespannung unter Vorschaltung eines großen Widerstandes oder den Entladekreis an die Zelle, so wird hierdurch der gemessene Widerstand nur unmerklich geändert.

(271) Arbeitsmessung. Die von einer Sammlerbatterie während der Ladung aufgenommene sowie die bei der Entladung abgegebene Arbeit wird bestimmt durch fortwährende Messungen von Klemmenspannung und Stromstärke.

Man geht hierbei von der vollständig geladenen Batterie aus, entlädt bis zu der vom Fabrikanten vorgeschriebenen Klemmenspannung (etwa 1,8 V) und lädt bis zur vollen Gasentwicklung (Klemmenspannung etwa 2,6—2,8 V).

Es bedarf einiger Übung, um bei der nachfolgenden Ladung genau wieder den Punkt zu treffen, von dem man ausgegangen ist. Man lade nicht zu lange, da die bereits bei 2,4 V allmählich einsetzende Gasentwicklung Energieverlust bedeutet; man lade aber auch nicht zu wenig, da im Betriebe die Batterie bei zu schwacher Ladung notwendig sulfatieren muß. Will man zuverlässige Werte erhalten, so muß der ursprünglichen Ladung mindestens eine vollständige Entladung mit derselben Stromstärke möglichst unmittelbar vorausgegangen sein.

Aus den Messungen bei der Entladung ergibt sich die Kapazität der Batterie. Man unterscheidet die Kapazität in Amperestunden (C_a) von der Kapazität in Wattstunden (C_w).

Wird bei der Entladung die Stromstärke I konstant gehalten, so ist die Kapazität in Amperestunden:

$$C_a = I\,T,$$

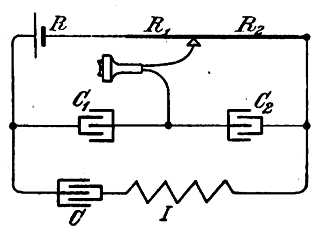


Abb. 100. Innerer Widerstand eines Elementes, stromfreie Messung.

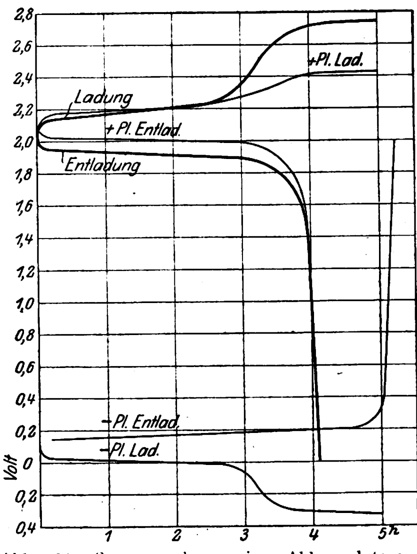


Abb. 101. Spannungskurve einer Akkumulatorenzelle bei Ladung und Entladung mit gleichbleibender Stromstärke.

worin T die Entladedauer in Stunden angibt. Je kleiner die Entladestromstärke gewählt wird, um so größer wird nicht nur die Entladedauer T, sondern auch die Kapazität C_a. Für die Berechnung der Kapazitäten bei verschiedenen Entladeströmen sind mehrfach Formeln aufgestellt worden, so von L i e b e n o w und P e u k e r t, doch ergeben sie große Abweichungen. Nach L i e b e n o w findet zwischen T und C_a folgende einfache Beziehung statt:

$$C_a = k \Big/ \left(1 + \frac{b}{\sqrt{T}}\right).$$

Von den Konstanten k und b hängt letztere nur von der Plattenkonstruktion ab, k ist der Anzahl der Plattenpaare des Elementes direkt proportional.

Ist die Stromstärke nicht konstant, so liest man am besten in regelmäßigen Zeitintervallen ΔT ab und hat dann:

$$C_a = \Sigma I \Delta T.$$

Mißt man in gleicher Weise während der Ladung die Stromstärken I' in den Zeitintervallen $\Delta T'$, so nennt man den Quotienten $\Sigma I \Delta T / \Sigma I' \Delta T'$ das Güteverhältnis des Akkumulators.

In gleicher Weise verfährt man zur Bestimmung der Kapazität in Wattstunden, wobei nur das Produkt $I \Delta T$ überall noch mit der Klemmenspannung zu multiplizieren ist.

Es ist $C_w = \Sigma V I \Delta T$.

Der Quotient $\Sigma V I \Delta T / \Sigma V' I' \Delta T' = \eta$ heißt der Wirkungsgrad.

Güteverhältnis und Wirkungsgrad sind nicht ganz unabhängig von den Stromstärken.

Zur besseren Übersicht trägt man die Ablesungen in ein Koordinatennetz ein, wobei die Abszissen die Zeit, die Ordinaten bei gleichbleibender Stromstärke die Spannungen und bei variabler die Leistung darstellen. Die zu einer Entladung gehörige Ladung zeichnet man auf dasselbe Blatt. In Abb. 101 stellen die stark ausgezogenen Linien eine solche Entladung und Ladung mit konstanter Stromstärke einer Zelle der Akkumulatorenfabrik A.-G. dar. Ladung und Entladung von Edisonzellen s. Abb. 333 bis 338, Seite 399 u. 400.

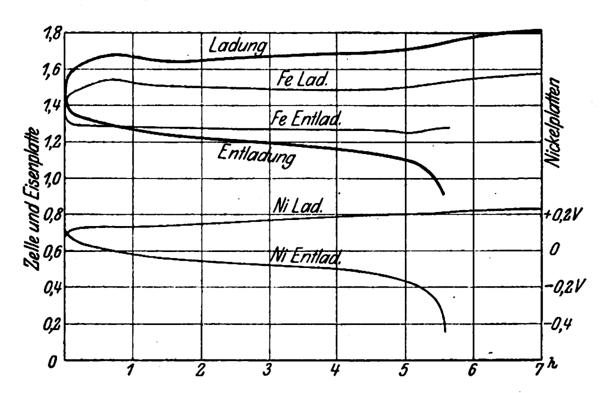


Abb. 102. Spannungsverlauf bei Ladung und Entladung einer Edisonzelle.

Mit Registrierinstrumenten erhält man ohne weiteres die fertigen Diagramme. An kleinen Akkumulatoren ermittelt man gelegentlich die entnommene Strommenge mit dem Voltameter. Es entspricht dann 1 Amperestunde 1,18 g Kupfer oder 626 cm³ Knallgas bei 0° C und 760 mm Druck.

Zur Bestimmung der Elektrizitätsmengen oder der ganzen Arbeit kann man die für elektrische Anlagen gebräuchlichen Elektrizitäts- und Arbeitsmesser benutzen.

Die Ermittlung des spezifischen Gewichtes der Säure gibt einen Aufschluß über die noch erforderliche Ladezeit bzw. über den noch vorhandenen Vorrat an Elektrizität (vgl. im Abschnitt Akkumulatoren), doch hat man darauf zu achten, daß der Säurestand nachhinkt und das spez. Gew. von der Temperatur abhängig ist.

(272) Spannungsverteilung. Für die genauere Untersuchung einer Zelle bedient man sich der Fuchsschen Methode, indem man eine Hilfselektrode aus Kadmium oder amalgamiertem Zink in das Elektrolyt einführt und bei jeder Ablesung nicht nur die Klemmenspannung des Elementes, sondern auch die Spannungen sowohl zwischen Anoden und Hilfselektrode als auch zwischen Kathoden und Hilfselektrode mißt. Diese drei Ablesungen trägt man wie oben als Ordinaten in ein Koordinatennetz ein und erhält so einen Überblick über die Kapazität sowohl der Anoden wie der Kathoden (siehe Abb. 101 die schwach ausgezogenen Linien). Die Kapazität des Elementes ist erschöpft, sobald eine der beiden Elektrodenarten erschöpft ist. Über Vorsicht bei dieser Messung siehe Liebenow, Zeitschrift für Elektrochemie Bd. 8, 1902, S. 616.

Holland (Electrician 1910, 21. Oktober, S. 48) benutzt teilweise entladene Kupferoxyd- oder Nickeloxydelektroden für Messungen an Edisonzellen. Abb. 102 gibt den Verlauf der Eisen- und Nickelelektrode bei Ladung und Entladung wieder.

Dritter Abschnitt.

Photometrie.

Grundlagen, Gesetze und Einheiten.

(273) Photometrische Größen. Jede Lichtquelle erzeugt einen Lichtstrom. Auch bei dem Licht, das auf einen Gegenstand auftrifft und ihn beleuchtet, bei dem von einem Gegenstand zurückgeworfenen Licht, beim Licht, das durch eine Blende (Fenster!) tritt usw., handelt es sich um einen Lichtstrom Φ, dessen Größe in Lumen angegeben wird (Abkürzung Lm). Leuchtet eine Lichtquelle mit dem Lichtstrom Φ Lm während T Stunden, so ist die Lichtabgabe $Q = \Phi \cdot T$ Lumenstunden (Lmh). Trifft ein Lichtstrom Φ auf eine Fläche von $S\,m^2$, so ist die Beleuchtung $E = \frac{\Phi}{S}$ in Lm/m² oder Lux (Abkürzung Lx). Die Beleuchtung der Fläche braucht nicht überall gleich zu sein, in diesem Falle ist $E = \frac{\Phi}{S}$ die mittlere Beleuchtung.

Diese Gleichung für die Beleuchtung ist unabhängig von der Richtung aus der der Lichtstrom auftrifft (siehe Teichmüller, J. Gas u. Wasser 1914, S. 57, 193). Kann man somit die Beleuchtung auch bezeichnen als die Lichtstromdichte, bezogen auf die Fläche, so gibt es bei punktförmigen Lichtquellen außerdem noch die Lichtstromdichte bezogen auf den Raumwinkel:

$$J = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

Es ist diese Größe, welche als Lichtstärke bezeichnet und in Hefnerkerzen (Zeichen HK) gemessen wird. Da keine Lichtquelle ihren Lichtstrom in allen Richtungen des Raumes gleichmäßig ausstrahlt, ist ihre Lichtstärke nicht eindeutig bestimmt. Es ist notwendig anzugeben, in welcher Richtung die Lichtstärke gemessen wurde (z. B. horizontale Lichtstärke), oder ob es sich um einen Mittelwert aus zahlreichen Lichtstärkemessungen handelt (mittlere räumliche Lichtstärke, mittlere halbräumliche Lichtstärke).

Das Verhältnis der Lichtstärke eines Flächenelements (in einer Richtung) zur scheinbaren Größe (Projektion) des Flächenelements in dieser Richtung ist die Flächenhelle e der leuchtenden Fläche. Sie wird gemessen in HK/cm².

(Literatur über photom. Größen: Liebenthal, Prakt. Photometrie 1907, S. 146—151; Teichmüller, ETZ 1917, S. 296, 308, 359; Halbertsma, E. u. M. 1917, S. 602.)

(274) Photometrische Grundgesetze.

A. Ein Lichtstrom, der sich im Raume fortpflanzt (paralleles Licht) bzw. ausbreitet (Lichtkegel bei punktförmigen Lichtquellen), erleidet hierbei keine Schwächung, außer der Absorption in der Atmosphäre, die jedoch unter normalen Verhältnissen erst bei größeren Entfernungen sich bemerkbar macht (Scheinwerferphotometrie). Hieraus folgen die Gesetze B—E:

B. Für eine kleine beleuchtete Fläche (Flächenelement) und eine punktförmige Lichtquelle ist bei senkrechtem Auftreffen des Lichtstroms auf die Fläche

$$E = \frac{J}{r^2}$$

(r = Entfernung zwischen Lichtquelle und Fläche in m).

C. Falls der Lichtstrom unter einem Winkel α auftrifft, wird, gegenüber der Beleuchtung E bei senkrechtem ($\alpha = 0°$) Einfall des Lichtes,

$$E' = E \cdot \cos\alpha.$$

D. Wird ein Flächenelement durch eine parallel zu ihm verlaufende unendlich lange Linie beleuchtet, so ist

$$E = J \cdot \frac{\pi}{2r},$$

wobei J die (aus größerer Entfernung bestimmte) Lichtstärke für 1 m der leuchtenden Linie ist.

E. Wird ein Flächenelement durch eine parallel zu ihm verlaufende unendlich große Fläche beleuchtet, so ist

$$E = J \cdot \pi,$$

wenn J die (aus größerer Entfernung bestimmte) Lichtstärke von 1 m² der leuchtenden Fläche ist.

F. Gesetz von Lambert: Die Flächenhelle eines vollkommen diffus leuchtenden (selbstleuchtenden, reflektierenden oder durchscheinenden) Flächenelements ist in jeder Richtung gleich. Für die Lichtstärke des Flächenelements unter dem Winkel α gilt dann

$$J_\alpha = J_{max} \cdot \cos\alpha.$$

G. Gesetz von Mascart: Befindet sich eine Lichtquelle in einem allseitig geschlossenen Raum, so ist der von den Wänden dieses Raumes absorbierte Lichtstrom gleich dem von der Lichtquelle erzeugten Lichtstrom.

H. Bringt man vor einer leuchtenden Fläche eine Blende an, so kann man diese als Lichtquelle betrachten (äquivalente Leuchtfläche). Ihre Lichtstärke ist das Produkt aus der Blendenöffnung in cm² und der Flächenhelle der eigentlichen leuchtenden Fläche.

J. Talbotsches Gesetz (nach Helmholtz): Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäßig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein kontinuierlicher Lichteindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Dauer der Periode verteilt würde.

(275) Photometrische Einheiten. Die grundlegenden Untersuchungen und Vereinbarungen über die bei Lichtmessungen verwendete Einheitslichtquelle stammen aus der Zeit, wo Vorrichtungen zum Messen des Lichtstroms einer Lampe (291) noch nicht genügend durchgebildet waren. Die älteren Photometer waren durchweg für die Messung der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung eingerichtet. Dementsprechend wurde als Einheit der Lichtstärke die leicht reproduzierbare horizontale Lichtstärke verschiedener Normallampen eingeführt. Solche sind:

1. Die Hefnerkerze, die Lichtstärke der Amylazetatlampe von v. Hefner-Alteneck, als Lichteinheit angenommen vom Elektrotechnischen Verein, dem Verein der Gas- und Wasserfachmänner und dem Verband Deutscher Elektrotechniker. Ihre Definition lautet (vgl. ETZ 1886, S. 139): „Als Einheit der Lichtstärke dient die frei, in reiner und ruhiger Luft brennende Flamme, welche sich aus dem horizontalen Querschnitt eines massiven, mit Amylazetat gesättigten Dochtes erhebt. Dieser Docht erfüllt vollständig ein kreisrundes Neusilberröhrchen, dessen lichte Weite 8 mm, dessen äußerer Durchmesser 8,3 mm beträgt,

und welches eine freistehende Länge von 25 mm besitzt. Die Höhe der Flamme soll, vom Rande der Röhre bis zur Spitze gemessen, 40 mm betragen. Die Messungen sollen erst 10 Minuten nach der Entzündung der Flamme beginnen." — Die Lampe ist reproduzierbar; sie wird von der Phys.-Techn. Reichsanstalt beglaubigt (Liebenthal, Prakt. Photometrie 1907, S. 411).

Abhängigkeit von Flammenhöhe, Luftdruck, Feuchtigkeit und Kohlensäuregehalt. Bei einer Flammenhöhe l von etwa 40 mm ist die Lichtstärke $= 1 + 0{,}027 \cdot (l - 40)$. Das Amylazetat ($C_7H_{14}O_2$) soll öfters fraktioniert werden (Siedepunkt 138°). 40 mm Änderung des Barometerstandes ändern die Lichtstärke um 0,4 %. Bedeutet e die Dampfspannung des Wasserdampfes, so ist die Lichtstärke $= 1{,}050 - 0{,}0075 \cdot e$. Enthält 1 m³ Luft K Liter Kohlensäure, so beträgt die Berichtigung der Lichtstärke $- 0{,}0072 \cdot K$; in gut gelüfteten Räumen ist sie zu vernachlässigen. In kleinen geschlossenen Räumen, insbesondere in geschlossenen photometrischen Apparaten kann man mit der Hefnerlampe nicht richtig messen.

Die Wandstärke des Dochtröhrchens ist wichtig; bei einer Blechdicke von 0,2, 0,25, 0,3, 0,4 mm ist die Lichtstärke kleiner um 0,4, 1,8, 2,8, 4,1 % als bei 0,15 mm; bei dünner Wand brennt die Lampe mit normaler Lichtstärke, aber unruhig (Ausführliches siehe Liebenthal, Prakt. Photometrie 1907, S. 111.

2. Platineinheit von Violle: die Lichtstärke, welche ein Quadratzentimeter der Oberfläche von geschmolzenem Platin im Moment des Erstarrens in senkrechter Richtung besitzt. Der zwanzigste Teil dieser Einheit heißt bougie décimale. Diese wird praktisch dargestellt durch einen bestimmten Teil des Mittels der mittleren, senkrecht zur Lampenachse gemessenen Lichtstärken von mindestens fünf aus einer Zahl geeichter Glühlampen, die an behördlicher Stelle aufbewahrt werden.

3. Die französische Carcellampe.

4. Englische Normalkerze (London spermaceti candle).

5. Harcourts Pentanlampe.

6. Die alte deutsche Vereinskerze ist eine Paraffinkerze von 20 mm Durchmesser.

Diese Lampen werden zum Teil im Auslande als Lichteinheit gebraucht, zum Teil besitzen sie nur historisches Interesse (Ausführliches siehe Liebenthal, Prakt. Photometrie 1907, S. 103—111, 122—146).

Im Jahre 1909 haben Frankreich, England und die Vereinigten Staaten die geringen Unterschiede zwischen ihren Lichtstärkeeinheiten ausgeglichen (Uppenborn-Monasch, Lehrbuch der Photometrie 1912, S. 31). Die neue Einheit (Standardkerze) ist um 11 % größer als die Hefnerkerze. Bei ausländischen Literaturangaben ist dieser Unterschied zu berücksichtigen, der auch für die aus der Lichtstärke abgeleiteten Einheiten (Lumen, Lux, Kerze/cm²) gilt.

Eine Lichtquelle, die in jeder Richtung die Lichtstärke 1 HK aufweist, erzeugt einen Lichtstrom von 4π (12,57) Lm. (Der volle Raumwinkel umfaßt 4π Raumwinkeleinheiten, gemessen durch die Oberfläche einer um die Lichtquelle gelegten Kugel vom Radius 1.)

Wird die innere Fläche dieser Kugel von der Größe 4π m² von dem als gleichmäßig verteilt angenommenen Lichtstrom getroffen, so ist $E = \frac{\Phi}{S} = 1$ Lx.

Die Beleuchtung von 1 Lx ist also nicht nur vorhanden, wenn 1 Lm auf 1 m² fällt, sondern auch wenn eine Fläche in 1 m Entfernung von einer Lichtquelle mit der Lichtstärke 1 HK senkrecht getroffen wird (daher alte Bezeichnung Meterkerze für das Lux).

(276) Flammenmaße. Bei allen gebräuchlichen Normallampen wird die Lichtstärke einer Flamme als Einheit gebraucht. Soweit nicht oberer und unterer Teil der Flamme abgeblendet werden, ist die Lichtstärke abhängig von der Flammenhöhe. Diese wird daher mittels besonderer Vorrichtungen beobachtet und eingestellt.

Das optische Flammenmaß von Krüß besteht aus einer konvexen Linse, welche von der Flamme ein Bild auf einer matten Glastafel erzeugt; an einer Teilung, die auf dieser Tafel eingeätzt ist, kann die Flammenhöhe abgelesen werden. Die Linse von der Brennweite f wird in der Entfernung $2f$ von der Flamme aufgestellt; die matte Glastafel ist in der Entfernung $2f$ mit der Linse fest verbunden. Es entsteht dann auf der letzteren ein reelles umgekehrtes Bild der Flamme, welches genau ebenso groß ist wie die Flamme selbst. Scharfe Einstellung ist erforderlich.

Flammenmaße sind ferner das zur Hefnerlampe gehörende Visier und der Flammenmesser von Martens. Im Weberschen Photometer (284) ist ein Flammenmaß fest eingebaut.

(277) Zwischenlichtquellen. Die in (275) erwähnten Normallampen sind gegen Störungen sehr empfindlich; auch ist häufig das Verhältnis der zu messenden Lampe zu der Normallampe zu sehr von 1 verschieden; man vergleicht dann die Lichteinheit zuerst mit einer Lampe, deren Lichtstärke eine mittlere Größe hat, und mit letzterer erst die zu messende Lampe. Als solche Zwischenlichtquellen kommen kaum andere als elektrische Glühlampen (Kohlenfaden- und Vakuum-Metalldrahtlampen) in Betracht.

Glühlampen ändern ihre Lichtstärke mit der Zeit. Brennen die Lampen mit verminderter Spannung, so bleibt die Lichtstärke sehr gleichmäßig. Sie sollen jedoch schon längere Zeit (mindestens 100 Stunden lang) bei normaler Spannung gebrannt haben, d. h. gealtert sein, und werden dann längere Zeit hindurch bei der verringerten Spannung eine konstante Lichtstärke aufweisen. Derartige Glühlampen werden von der Phys.-Techn. Reichsanstalt geeicht. Man sollte mindestens mit einer derartigen sekundären Normallampe von Zeit zu Zeit die Gebrauchsnormalen (Glühlampen) nachprüfen. Für die Einstellung der Glühlampen auf konstanten Strom oder konstante Spannung siehe (299). Fehlt elektrische Energie, so kann man auch große Petroleumrundbrenner als Zwischenlichtquelle verwenden. Bei Verwendung von Gaslampen beachte man, daß die Lichtstärke sehr abhängig ist vom Gasdruck.

(278) Objektive Photometrie ist die Lichtmessung ohne Zuhilfenahme des Auges. Man macht hierbei Gebrauch von der Tatsache, daß das Licht nicht nur einen Reiz auf das Auge ausübt, sondern auch physikalische bzw. chemische Wirkungen verschiedener Art auslöst (daher die Bezeichnung: physikalische Photometrie). Zu diesen gehören Wärmewirkungen, die durch Bolometer oder Thermoelement gemessen werden, die Änderung des elektrischen Widerstandes (Selenzelle), die photoelektrische Wirkung (Hallwachseffekt) in lichtelektrischen Alkalizellen. Das Ergebnis der Lichtmessung kann hierbei direkt abgelesen werden (Galvanometerausschlag). Eine vorherige Eichung mit einer Lichtquelle von bekannter Stärke ist erforderlich.

Die Durchführbarkeit der objektiven Photometrie hängt von zwei Bedingungen ab. 1. Die Apparate müssen eine genügende Konstanz aufweisen, d. h. bei gleicher Beleuchtung zu verschiedenen Zeiten gleiche Ausschläge zeigen. 2. Da sie die Lichtstrahlung so messen sollen, wie sie auf das Auge wirkt, müssen sie für die verschiedenen Wellenlängen des Spektrums die gleiche Empfindlichkeit aufweisen wie das Auge. Von sich aus besitzt keines der obengenannten objektiven Photometer diese Eigenschaft. Man kann sie ihnen aber mehr oder weniger vollkommen verleihen, indem man entsprechende Lichtfilter verwendet und den starken Lichtverlust durch empfindliche Galvanometer ausgleicht.

Das objektive Photometer ist zurzeit noch ein in der Entwicklung befindliches Laboratoriumsinstrument (Elster und Geitel, Voege, Moll, Richtmeyer, Ives, Coblentz u. a.). Praktische Anwendung hat es bis jetzt nur in Sonderfällen gefunden, z. B. zur Aufnahme von Lichtverteilungskurven (Voege, ETZ 1908, S. 49) und zur Messung der Lichtschwankungen bei Bogenlampen.

(279) Subjektive Photometrie. Das menschliche Auge ist nicht in der Lage, eine Lichtstärke, eine Beleuchtung oder eine Flächenhelle einigermaßen genau zu schätzen. Direkte Lichtmessungen sind ebenfalls unmöglich. Wenn dennoch das Auge bei der subjektiven Photometrie verwandt wird, so benutzt man hierbei seine Fähigkeit, die Gleichheit der Flächenhelle bei zwei benachbarten Flächen, bzw. die Gleichheit des Kontrastes bei zwei Paar benachbarten Flächen festzustellen. Voraussetzung ist, daß die verglichenen Flächen in der Farbe keinen Unterschied aufweisen. Je größer der Unterschied der Farbe, um so schwerer fällt, besonders dem ungeübten Auge, das Urteil über die Gleichheit der Flächenhellen.

Unter Photometer in engerem Sinne versteht man optische Vorrichtungen, durch welche man das von zwei Lichtquellen ausgehende Licht vergleichen kann. Die beiden Lichtströme werden auf zwei weißen Flächen aufgefangen, und diese durch Prismen oder Spiegel gleichzeitig im Ge ichtsfeld des Photometers abgebildet.

Da die weißen Flächen im Photometer (Gipsplatten, Milchglasscheiben) gewöhnlich von gleicher Beschaffenheit sind, vergleicht man mit dem Photometer nicht nur Flächenhellen, sondern auch die Beleuchtungen auf diesen Flächen. Man sorgt nun dafür, daß die eine Seite des Photometers von einer Normallampe beleuchtet wird. Diese Beleuchtung berechnet man nach der Gleichung (B) und findet damit die Beleuchtung auf der anderen Seite des Photometers. Obgleich jedes Photometer zunächst ein Instrument zur Messung von Beleuchtungen darstellt und eine direkte Messung von Lichtstärken unmöglich ist, kann man aus der gefundenen Beleuchtung doch die Lichtstärke einer Lichtquelle errechnen, falls die Beleuchtung n u r von ihr stammt und ihre Entfernung bekannt ist. ($J = E \cdot r^2$ bei senkrechtem Auftreffen des Lichtstromes.)

Photometer.

(280) Gleichheitsphotometer (Photometer zur Beobachtung gleicher Flächenhelle). B u n s e n verwandte eine Scheibe von ungleicher Durchlässigkeit für das Licht (Papier mit einem Fettfleck, zwei oder mehrere übereinander gelegte Papiere, in deren einem eine Öffnung ausgeschnitten ist u. dgl.). Sie wird von beiden Lichtquellen beleuchtet, von jeder nur auf einer Seite. Die beiden Lichtquellen stehen mit der Mitte der Scheibe in einer Geraden, die Fläche der Scheibe steht zu dieser Geraden senkrecht. Gewöhnlich befindet sich hinter der Scheibe ein Paar Spiegel, in denen man die beiden Seiten der Scheibe gleichzeitig erblickt; man stellt so ein, daß der Fettfleck in beiden Spiegelbildern gleich viel dunkler erscheint als das umgebende Papier. J o l y und E l s t e r verwenden anstatt des Fettfleckpapiers ein parallelepipedisches Stück Paraffin, das durch ein eingelegtes senkrechtes dünnes Metallblatt in zwei Hälften zerlegt wird, oder zwei durch ein Staniolblatt getrennte dicke Milchglasplatten, deren dem Auge zugewandte Vorderflächen poliert sind; jede Seite erhält ihr Licht nur von einer der zu vergleichenden Quellen.

L u m m e r und B r o d h u n ersetzten den Fettfleck des B u n s e n schen Photometers durch zwei aneinander gepreßte rechtwinklige Prismen (A, B, Abb. 103). Die Hypotenusenfläche des einen Prismas ist bis auf einen ebenen mittleren Teil durch eine Kugelfläche ersetzt, der gebliebene ebene Kreis rs wird an die Hypotenusenfläche ab des anderen Prismas angedrückt. Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen beleuchten die beiden Seiten des weißen undurchsichtigen Schirmes ik; f und e sind zwei Spiegel, welche das von l und λ diffus zurückgeworfene Licht senkrecht auf die Kathetenflächen dp und bc leiten. Das durch dp eingetretene Licht geht durch die Fläche rs; das durch bc kommende Licht wird bei rs vollkommen durchgelassen, während der übrige Teil von ab das dort auftreffende Licht vollkommen zurückwirft. Es erscheint so ein Kreis, der nur von der linken Lichtquelle Licht erhält, in einem Felde, das nur von der rechten Lichtquelle beleuchtet wird. Das Prisma abc wird durch eine Lupe w von der Seite ac her betrachtet; die Einstellung geschieht wie beim B u n s e n schen Photometer auf

gleiche Helligkeit des Kreises und des Feldes. Die Ränder des ersteren verschwinden vollkommen. Das Photometerfeld stellt Abb. 104 dar. Um Ungleichheiten der beiden Seiten des Photometerkopfes zu beseitigen, ist er drehbar (Achse *A*, Abb. 103) eingerichtet; man macht alsdann in jeder der beiden um 180° verschiedenen Stellungen eine Messung.

(281) Kontrastphotometer. Um die Empfindlichkeit dieses Photometers noch weiter zu steigern, bedeckten Lummer und Brodhun die Hälften der Kathetenflächen mit durchsichtigen Glasplatten *bg* und *cm*, welche einen Teil des Lichtes absorbieren (Abb. 105 links). Die Hypotenusenflächen werden demnach in zwei ungleich beleuchtete Hälften geteilt. Ätzt man nun aus diesen Flächen geeignete Figuren heraus, so daß die Hypotenusenflächen teils vollkommen durchsichtig sind, teils vollkommen zurückwerfen, so erhält man eine Einstellung auf gleiche Helligkeitsunterschiede (Photometerfeld Abb. 105 rechts).

Im übrigen gilt für die Messung mit diesem Photometer alles im vorhergehenden Gesagte. Die Genauigkeit ist erheblich größer als beim Bunsenschen Photometer, bei Anwendung des Kontrastes etwa ¼%.

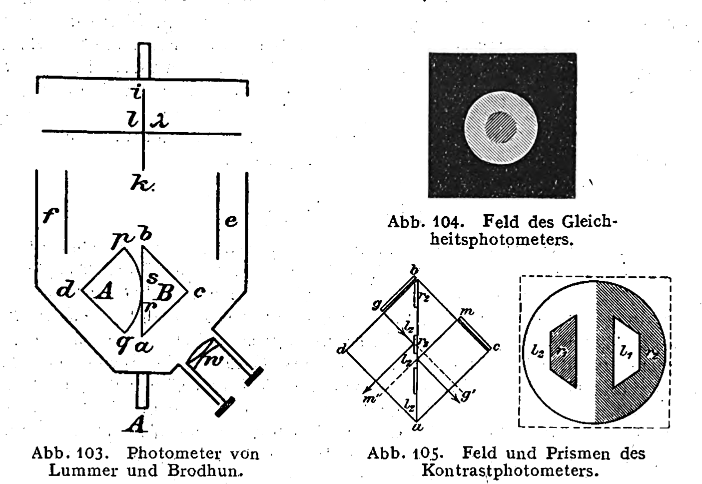


Abb. 103. Photometer von Lummer und Brodhun.

Abb. 104. Feld des Gleichheitsphotometers.

Abb. 105. Feld und Prismen des Kontrastphotometers.

Krüß hat dieses Photometer zum Sehen mit beiden Augen eingerichtet; es enthält zwei Lummer-Brodhunsche Würfel, für jedes Auge einen, die mit Hilfe zweier Prismenzusammenstellungen und Lupen angesehen werden. Die Empfindlichkeit der Einstellung ist größer als bei einäugigem Sehen.

Einfachere Kontrastphotometer werden von Krüß und von Schmidt und Haensch hergestellt. Man erblickt einen in Quadranten geteilten Kreis.

(282) Mittel der Abgleichung. Da die subjektive Photometrie auf der Gleichheit zweier Beleuchtungen beruht, sind Hilfsmittel erforderlich, durch die entweder die gesuchte Beleuchtung, oder die Beleuchtung durch die Normallampe, oder beide solange geändert werden, bis die Abgleichung erfolgt ist (Nullmethode).

1. Die einfachste Abgleichung der Beleuchtung erfolgt durch Änderung der Entfernung einer oder beider Lichtquellen. Man verwendet hierzu eine mit Längenteilung versehene Photometerbank und berechnet die Lichtstärke aus der Beleuchtungsstärke mittels des quadratischen Entfernungsgesetzes (274 B). Steht links die Lichtquelle mit der gesuchten Lichtstärke J, rechts die Normallampe

mit der Lichtstärke J_n und beträgt die Ablesung nach Verschieben und Einstellen des Photometers a cm bei einer gesamten Banklänge von l cm, so ist

$$J = \frac{a^2}{(l-a)^2} \cdot J_n.$$

Will man die Beleuchtung des Photometers konstant halten (10—30 Lx zweckmäßig) so bringt man die Normallampe in entsprechender fester Entfernung b von dem Photometer an und verschiebt beide gleichzeitig zur Lichtquelle. Dann ist

$$J = a^2 \cdot \frac{J_n}{b^2}.$$

2. Sektorenscheiben mit veränderlichem Ausschnitt. Läßt man in den Strahlen einer Lampe eine Kreisscheibe rasch umlaufen, welche Ausschnitte trägt, so erscheint das durchtretende Licht geschwächt im Verhältnis der freien Sektoren zum ganzen Kreis (vgl. 274 J). Verbesserte Sektorenvorrichtung nach Brodhun siehe (285).

3. Polarisation. Die zu vergleichenden Lichtstrahlen sind senkrecht zueinander polarisiert. Man sieht die zwei Flächen durch den Analysator (Nicolsches Prisma) und kann durch Drehen des letzteren die Helligkeiten gleichmachen.

4. Gitterlichtschwächer von Krüß (J. Gas u. Wasser 1914, S. 457; Z. f. Instrk. 1917, S. 73, 109).

5. Verstellbare Blenden in Verbindung mit Milchglasscheiben, wie Irisblenden, Spaltblenden (Photometer von Blondel und Broca, Glühlampenphotometer von v. Voß, ETZ 1917, S. 188).

6. Rauchglasscheiben und Milchglasscheiben dienen dazu, den Meßbereich eines Photometers zu erweitern, indem sie das Licht der Normallampe oder die zu messende Beleuchtung in größeren Stufen schwächen. Ihre Verwendbarkeit wird dadurch eingeschränkt, daß sie das Licht selektiv absorbieren, und dadurch die Farbe des Lichtes ändern. Diesen Fehler haben die Mittel zur Lichtschwächung unter 1 bis 5 nicht.

(283) Winke für die Benutzung der Photometerbank. Die Beurteilung der Gleichheit der Bilder des Photometerfeldes muß rasch erfolgen, längeres Hinschauen und Prüfen erhöht die Genauigkeit nicht, sondern ermüdet nur das Auge. — Größere Genauigkeit erreicht man durch Wiederholung der Beobachtungen; von Vorteil sind dabei Vertauschungen der zu vergleichenden Lichtquellen oder Drehung des Photometerkopfes um 180°.

Aufstellung der Photometerbank. Hierzu eignet sich ein vollkommen dunkler, mattschwarz oder rotbraun angestrichener und am besten an der Seite, wo die Photometerbank steht, in der Höhe der letzteren mit einem Streifen mattschwarzen Stoffes ausgeschlagener Raum. In manchen Fällen hilft man sich dadurch, daß man das Photometer geschlossen baut, entweder mit festem Blechmantel oder mit Tuchvorhängen. Auf alle Fälle soll durch Schirme aus mattschwarzem Stoff mit Ausschnitten in der Mitte, welche auf die Photometerbank gestellt werden, das fremde Licht abgeblendet werden; man darf vom Orte des Photometerkopfes nur das Licht sehen, welches von den zu vergleichenden Lichtquellen kommt. Das Auge des Beobachters darf nur Licht aus dem Photometerkopf empfangen. Zum Ablesen der Teilung der Photometerbank diene eine kleine, schwach leuchtende und gegen das Auge vollkommen abgeblendete Glühlampe. Die Niederschrift der Meßergebnisse überlasse man wenn möglich einem zweiten Beobachter, der auch für die Einstellung der Normallampe zu sorgen, bzw. die Meßinstrumente abzulesen hat.

(284) Das Photometer von Leonh. Weber war das erste „tragbare" Photometer. Es trägt neben dem Photometer im engeren Sinne die Vergleichslichtquelle und die Einrichtung zum Abgleichen der Beleuchtung. Es besteht aus zwei innen geschwärzten Röhren A, B (Abb. 106), in denen sich Milchglasplatten a, b befinden.



Die Röhren stehen aufeinander senkrecht; die eine, A, ist in der wagerechten Ebene um eine Stange drehbar, die andere, B, kann in einer senkrechten Ebene um die Achse der feststehenden Röhre gedreht werden, um unter beliebigem Winkel zu messen. Das Okular enthält einen Schieber mit Blenden, O, und ein umklappbares Reflexionsprisma s zur Erleichterung der Ablesung bei schrägem Stand von B.

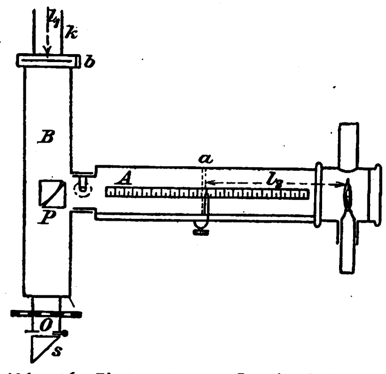


Abb. 106. Photometer von Leonhard Weber.

Die Milchglasplatten in den Röhren werden von den zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet. Die Platte a in der wagerechten Röhre ist verschiebbar; ihre Entfernung l_2, welche größer als 10 cm sein muß, von der sie beleuchtenden kleinen Benzinflamme kann außen am Rohre abgelesen werden. Am Ende der beweglichen Röhre ist die zweite Platte b befestigt, welche beleuchtet wird (eventuell von einer zu messenden Lichtquelle, wobei seitliches Licht durch das Rohr k ferngehalten wird). Die Flammenhöhe der Benzinlampe wird auf 20 mm gehalten und an einem kleinen Maßstab oder am optischen Flammenmaß (276) abgelesen.

Man vergleicht durch den Lummer-Brodhunschen Würfel P die Beleuchtungen und verschiebt die bewegliche Platte a bis zur photometrischen Einstellung. Die Beleuchtung auf b ist dann $E = \frac{C}{l_2^2}$ und die Lichtstärke einer Lichtquelle in der Entfernung l_1

$$J = C \cdot \frac{l_1^2}{l_2^2}.$$

Die Milchglasplatte b kann je nach der Lichtstärke der zu messenden Lichtquelle gewählt werden; dem Photometer sind zu diesem Zweck mehrere Platten beigegeben, die einzeln oder zu mehreren eingeschoben werden können. Für diese Platten und ihre Zusammenstellungen sind die Werte C im voraus ermittelt, welche in die obige Gleichung einzusetzen sind. Will man selbst C für eine Platte bebestimmen, so mißt man mit dieser Platte die Einheitslampe oder eine andere genau bekannte Lichtquelle.

Besser als die Benzinlampe ist eine kleine elektrische Glühlampe, vgl. hierzu (277). Hierfür werden die Konstanten des Photometers neu bestimmt.

(285) Das Straßenphotometer von Brodhun (Abb. 107) wendet der Lichtquelle das einerseits offene Rohr T zu, auf dessen Grund eine Gipsplatte angebracht ist. Das Licht, welches letztere trifft, wird durch ein total reflektierendes Prisma dem Lummer-Brodhunschen Photometerkörper P zugeführt und gelangt zum Okular o. Von der anderen Seite kommt das Licht, welches die von einer Maßlampe erleuchtete Milchglasplatte M aussendet, gleichfalls nach P. Die beiden Prismen p sitzen auf Scheiben, die mit einer rasch umlaufenden Achse fest verbunden sind; der Teil der Lichtstrahlen zwischen p und p beschreibt also einen Zylindermantel. Die in den Zeiger z auslaufende und mit der Hand drehbare Scheibe trägt zwei Sektorenausschnitte von 90°, welche gegen gleichgroße Ausschnitte der feststehenden Scheiben verstellt werden können, so daß das von rechts kommende Licht sowohl ganz abgeblendet, als auch während zweier Vierteldrehungen frei hindurchtreten kann. Durch Einstellen des Zeigers z auf dem Teilkreis kann man beliebige Schwächung des Lichts erzielen (siehe 282, 2). — Das Rohr T und die

Milchglasplatte *M* nebst Lampe können vertauscht werden. — Das Photometer wird auch in einer vereinfachten Form und mit erweitertem Meßbereich (durch Zufügung mehrerer Milchglasplatten *M*) hergestellt.

(286) Das Photometer von Martens (Abb. 108) zeigt das einerseits offene Rohr *T* wie das vorhergehende mit Gipsplatte; von da gelangt das Licht durch zwei total reflektierende Prismen in das Polarisationsphotometer *P* (282, 3). Hier wird die Flächenhelle der Gipsplatte verglichen mit derjenigen einer Milchglasplatte *M*, die von einer Glühlampe (277) erleuchtet wird. Muß der Nicol aus der Dunkelstellung bis zur photometrischen Einstellung um den Winkel φ gedreht werden, und ist l die Entfernung der Lichtquelle vom Gipsschirm, so ist die gesuchte Lichtstärke $J = C\, l^2 \operatorname{tg} \varphi^2$. Das Photometer wird durch Messung einer bekannten Lichtquelle geeicht. Die Neigung der Röhre *T* gegen die Wagrechte wird an einem Teilkreis abgelesen.

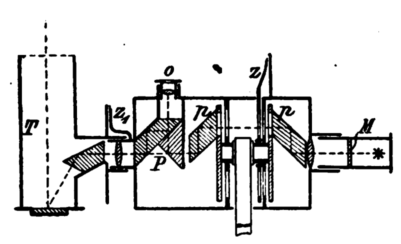


Abb. 107. Straßenphotometer von Brodhun.

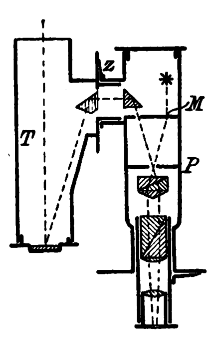


Abb. 108. Photometer von Martens.

Räumliche Lichtverteilung.

(287) Lichtverteilungskurve. Infolge der ungleichmäßigen Verteilung des ausgestrahlten Lichtstroms ist die Lichtstärke (Lichtstromdichte) bei fast sämtlichen Lichtquellen von der Strahlungsrichtung abhängig. Die Messung e i n e r Lichtstärke ist daher wertlos, man muß sie in verschiedenen Richtungen messen. Es genügt gewöhnlich als Lichtstärke unter einem bestimmten Winkel das Mittel aus zwei (oder mehr) gleichzeitigen Messungen auf gegenüberliegenden Seiten der Lampe (oder gleichmäßig um die Lampe verteilten Richtungen) zu nehmen.

Trägt man die Lichtstärken nach den verschiedenen Richtungen als Radien in ein Polarkoordinatennetz ein, so entsteht die Lichtverteilungs- oder P o l a r k u r v e, von der Abb. 113, linker Teil, die Hälfte zeigt. Eine vollständige Kurve soll durch Messungen von höchstens 10 zu 10° ermittelt werden.

Messungen von 15 zu 15° geben keine genaue Kurve. Es ist falsch, die gefundenen Punkte (Lichtstärkewerte) durch Gerade zu verbinden.

Die Lichtverteilungskurve ist ein Schnitt durch den Lichtverteilungskörper. Erfolgt die Lichtstrahlung symmetrisch zu einer Achse, was wir bei vielen Lichtquellen annehmen dürfen, so ist dieser Körper ein Rotationskörper und durch die Lichtverteilung als Achsenschnitt eindeutig bestimmt.

Man merke sich: Der Flächeninhalt der Lichtverteilungskurve ist k e i n Maß für den gesamten Lichtstrom.

(288) Lichtquelle oder Photometer werden gedreht. Um die Lichtstärke in verschiedenen Richtungen längs eines Meridiankreises zu bestimmen, ist es, falls die Lichtquelle das zuläßt, am besten, diese selbst zu drehen und das Photometer stehen zu lassen. In diesem Falle kann auch eine Photometerbank benutzt werden. Um z. B. Glühlampen unter verschiedenen Winkeln zu messen, kann man einen

Halter benutzen, der eine wagrechte und eine senkrechte Achse und zwei Teilkreise besitzt.

Die umgekehrte Anordnung, dahingehend, daß die Lampe feststeht und das Photometer um die Lampe herumgeführt wird, verwendet man höchstens in folgender Abart: Die Lampe kann an einem Aufzug gehoben und gesenkt werden. Der Photometerschirm wird dann geneigt, um die Strahlen, die schräg zur Photometerachse einfallen, aufzunehmen. Bei Verwendung einer Photometerbank soll der Schirm den Winkel zwischen den Strahlen, die ihn beiderseits treffen, halbieren; der Photometerkopf wird um eine wagrechte Achse drehbar gemacht und erhält eine Gradeinteilung. Zur Einstellung wird die Vergleichslampe verschoben. Leonh. Weber wendet der zu messenden Lampe eine Milchglasplatte zu (284), Brodhun ein einerseits offenes Rohr, in dessen Boden eine Gipsplatte eingesetzt wird (285).

(289) Drehbare Spiegel zur Messung der Lichtverteilung. Es bietet gewisse Vorteile, wenn weder das Photometer, noch die Lampe gedreht zu werden brauchen. Bei Gas- und Petroleumlampen, Bogenlampen und Gasfüllungs-Glühlampen ist die senkrechte Lage der Lichtquelle unbedingt einzuhalten. Man verwendet dann Vorrichtungen mit einem oder mehreren drehbaren Spiegeln, welche das Licht der verschiedenen Richtungen nacheinander in die Richtung des Photometers werfen.

In Abb. 109 (v. Hefner-Alteneck) bedeutet L die in der Photometerachse aufgehängte Lampe, S den Spiegel, der an einem Arm befestigt ist. Dieser Arm kann um die Photometerachse gedreht und sein Neigungswinkel, der zugleich der der Lichtstrahlen ist, bei k gemessen werden. Die Entfernung a bleibt stets dieselbe. S ist so einzustellen, daß die Strahlen von L nach Abb. 109 auf das Photometer geworfen werden. d ist ein Metallschirm, der das direkte Licht der Lampe vom Photometer abhält. Bei dieser Spiegelanordnung ist neben dem Lichtverlust am Spiegel zu berücksichtigen, daß das Licht etwas schräg auf das Photometer fällt (Photometer nach Weber, Brodhun und Martens ohne Rohr verwenden!) und daß die Entfernung zwischen L und P $a+\sqrt{a^2+l_1^2}$ ist. Man kann die Bestimmung des Spiegelverlustes und der anderen Korrekturen umgehen, indem man die horizontale Lichtstärke der Lampe über den Spiegel und dann nach Drehung der Lampe um 90° direkt mißt. Hierbei wird d entfernt, und dafür S abgedeckt. Man erhält so eine „Schwächungszahl" für die gesamte Spiegelanordnung und hat sämtliche Messungen durch diese zu dividieren, um die wirkliche Lichtstärke zu erhalten.

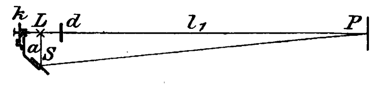


Abb. 109. Spiegel nach v. Hefner-Alteneck.

Bei der Spiegelanordnung nach v. Hefner-Alteneck darf P nicht verschoben werden (wichtig für Photometerbank). Der schräge Lauf des Lichtes erschwert das Abblenden zerstreuten Lichtes, was besonders in nicht vollständig dunklen Photometerräumen zu Fehlern führen kann.

Von diesen Fehlern frei ist der Winkelspiegel nach Ayrton und Perry (Abb. 110). Dieser um eine horizontale Achse drehbare, um 45° zu ihr geneigte Spiegel, wird auf das eine Ende der Photometerbank aufgestellt. Wird durch eine besondere Aufhängevorrichtung (Abb. 111) die bei B aufgehängte Lampe L im Kreis um den Spiegel S herumgeführt, so braucht S nur entsprechend mitgedreht zu werden, was durch zwangläufige Verbindung mit dem Drehpunkt A erfolgen kann. Um A dreht sich der Arm H, an dessen Ende die Lampe in B hängt.

Bei dem Doppelspiegel nach Martens (Abb. 112) befindet die Lampe L sich in der Achse der Photometerbank, die beiden Spiegel sind an einem auf der Bank aufgestellten Halter befestigt. Sie werden zusammen um die Photometerachse gedreht; hierbei geht der eine in der zur Bank senkrechten Ebene um die Lampe herum und leitet in jeder Stellung das Licht der Lampe dem zweiten Spiegel

zu, der es in die Photometerachse richtet. Die Entfernung LS_1S_2A bis über den Nullpunkt der Teilung ist 100 cm. Diese ist zur Banklänge hinzuzuzählen und außerdem der Lichtverlust durch die doppelte Spiegelung zu bestimmen und zu berücksichtigen.

(290) Bestimmung der mittleren Lichtstärke. Mittlere horizontale Lichtstärke. Die übliche Bauart der Photometerbänke bedingt, daß, falls nur eine Messung erfolgen soll, die horizontale Lichtstärke bevorzugt wird. Bei Lampen mit vertikaler Achse fällt sie häufig mit dem Maximum der Lichtstärke zusammen. [Bisherige Verwendung zur Kennzeichnung von Glühlampen (298)]. Da sie trotz der Symmetrie der Lichtausstrahlung bei einer und derselben Lampe Unterschiede aufweist, bestimmt man für genauere Arbeiten den Mittelwert der horizontalen Lichtstärke in allen Richtungen (mittlere horizontale Lichtstärke). Will man sie (für Glühlampen) mit einer einzigen Messung erhalten, so verwendet man bei geringeren Ansprüchen an Genauigkeit Winkelspiegel, oder man dreht die Glühlampe um ihre Längsachse; die Drehgeschwindigkeit soll so hoch sein, daß man kein Flimmern wahrnimmt. Statt die Lampe zu drehen, läßt man auch um die Achse der Lampe, welche in der Bankachse liegt, zwei Spiegel sich rasch drehen, die die Strahlen der Lampe auf den Photometerschirm werfen. Die direkten Strahlen sind abgeblendet. Gasfüllungslampen dürfen nicht gedreht werden, da ihre Lichtstärke sich ändert (Z. Beleucht. 1916, S. 111).

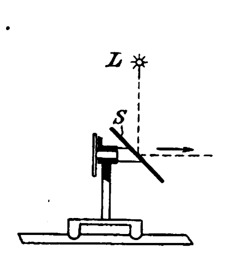


Abb. 110. Winkelspiegel von Ayrton und Perry.

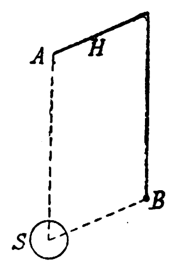


Abb. 111. Vorrichtung, um Lampen im Kreise herumzuführen.

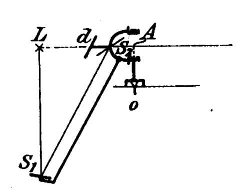


Abb. 112. Doppelspiegel von Martens.

Mittlere räumliche Lichtstärke und Lichtstrom. Die mittlere räumliche Lichtstärke (J_0) ist der Mittelwert aus allen Lichtstärkewerten. Die Anzahl der Lichtstärken ist, entsprechend der Anzahl der Richtungen im Raume, unendlich. Die Bestimmung der mittleren räumlichen Lichtstärke muß daher durch ein Näherungsverfahren erfolgen. Sie kann auch aus dem Lichtstrom ermittelt werden, entsprechend der Definition: Unter mittlerer räumlicher Lichtstärke versteht man die Lichtstärke, die in jeder Richtung vorhanden wäre, falls der Lichtstrom der Lichtquelle gleichmäßig im Raume verteilt ist. In diesem Falle wird $J = \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}\omega$ zu $J_0 = \Phi/4\pi$, weil der gesamte Raum 4π Raumwinkeleinheiten umfaßt.

Berechnung der mittleren räumlichen Lichtstärke. Sie erfolgt stets auf dem Umweg über die Lichtstromberechnung, indem als Produkt von Lichtstärke nnd zugehörigem Raumwinkel Teillichtströme ermittelt und addiert werden. Die Rechnung wird vereinfacht, indem die Lichtstärkewerte so gewählt werden, daß ihnen gleiche Raumwinkel entsprechen. Hering erhält diese Winkel, indem er die Lichtquelle von einem regelmäßigen Vielflächner umgeben denkt (z. B. 12- oder 20-Flächner). Die zu diesen Flächen senkrechten Lichtstärken ergeben dann, wie unsymmetrisch die Lichtverteilung auch sei, als Mittelwert die mittlere räumliche Lichtstärke (Elektrot. u. Maschinenb. 1917, S. 65). Wählt

man als Vielflächner den Würfel, so ergibt sich, daß die Messung der Lichtstärke unter ca. 55° und 125° (am besten bei rotierender Glühlampe) genügt, um angenähert J_0 zu erhalten. Dieselben charakteristischen Winkelwerte hat Zickler empirisch gefunden (Elektrotechn. u. Maschinenb. 1915, S. 469, 491; 1916, S. 257). Einen für diese vereinfachte Messung von J_0 bestimmten Apparat beschrieb Krüß (Z. f. Instrk. 1917, S. 33).

Setzt man eine axialsymmetrische Lichtverteilung voraus, so kann man die Verteilung in gleiche Raumwinkel durch die Bildung inhaltsgleicher Kugelzonen vornehmen. Kugelzonen gleicher Höhe genügen dieser Anforderung. Der Kugeldurchmesser wird in eine bestimmte Anzahl gleicher Teile geteilt (Verfahren von Bloch, Grundz. der Bel.-Techn. 1907, S. 17). Polarkoordinatenpapier mit entsprechender Winkelteilung wurde von Macbeth angegeben und wird jetzt von Schmidt und Haensch geliefert (ETZ 1914, S. 274). Es genügt dann, die Lichtstärken in der Mitte der Kugelzonen zu addieren und durch die Zahl der Zonen zu dividieren, um J_0 zu erhalten. Die Winkel sind für einen Halbraum bei Teilung in 10 Zonen: 18° 12′, 31° 47′, 41° 25′, 49° 28′, 56° 38′, 63° 15′, 69° 31′, 75° 31′, 81° 22′, 87° 8′. Das Verfahren ist insofern unbequem, als es zunächst das genaue Aufzeichnen einer Lichtverteilungskurve erfordert, denn man pflegt die Lichtstärke nicht unter den genannten Winkeln zu messen, sondern von 5 zu 5, oder 10 zu 10°.

Die unter gleichen Winkelabständen gemessenen Lichtstärkewerte kann man verwenden, wenn man jede mit dem zugehörigen Raumwinkel multipliziert. Die Lichtstärke unter 35° z. B. liefert, mit 0,628 multipliziert, den Lichtstrom zwischen 30° und 40°. Die Raumwinkel sind

zu 5° und 175°: 0,095	zu 55° und 125°: 0,897
zu 15° und 165°: 0,283	zu 65° und 115°: 0,993
zu 25° und 155°: 0,463	zu 75° und 105°: 1,058
zu 35° und 145°: 0,628	zu 85° und 95°: 1,091
zu 45° und 135°: 0,774	

(siehe auch Liebenthal, Prakt. Phot. 1907, S. 272—278).

Graphisches Verfahren nach Rousseau. Zur graphischen Ermittlung von J_0 trägt man nach Rousseau die Werte von J zur Polarkurve auf (Abb. 113). Von den Schnittpunkten der Radien mit dem äußeren Kreis zieht man wagrechte Linien und trägt von der Senkrechten aus die Lichtstärken auf. Man erhält auf diese Weise eine Kurve, deren mittlerer Abstand von der Senkrechten gleich der mittleren sphärischen Lichtstärke ist. Teilt man die Abb. 113 durch die wagrechte Mittellinie in zwei Teile, so liefert der obere Teil die obere, der untere die untere mittlere halbräumliche Lichtstärke. Die Konstruktion von Rousseau ergibt auf der Senkrechten Strecken, die dem betreffenden Raumwinkel entsprechen. Die einzelnen Trapeze, aus denen das Rousseau-Diagramm zusammengesetzt ist, stellen wieder Teillichtströme dar. Das jedesmalige Aufzeichnen der Konstruktion nach Rousseau erübrigt sich bei Verwendung eines

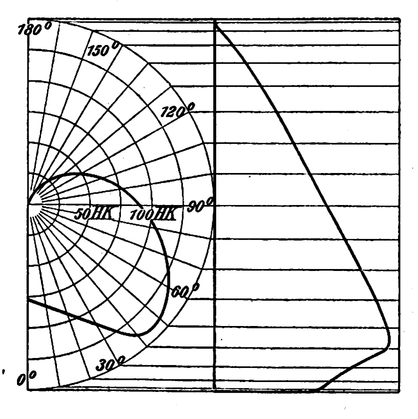


Abb. 113. Polarkurve und mittlere räumliche Lichtstärke (Rousseau).

Millimeterpapiers mit Sinusteilung von Schleicher und Schüll (ETZ 1916, S. 53). Das Rousseau-Diagramm hat für verschiedene Lichtquellen sehr einfache Formen und erleichtert daher die Berechnung und die Analyse der Lichtverteilung (vgl. Halbertsma, Lichttechnische Studien, Leipzig 1916).

Messung der mittleren räumlichen Lichtstärke. Verwendet man nicht einen drehbaren Spiegel (Abb. 109), sondern eine größere Anzahl von Spiegeln, die in ähnlicher Weise fest um die Lichtquelle herum angeordnet sind, so kann [nach (287)] durch entsprechende Verteilung der Spiegel oder durch Abblendung proportional den zugehörigen Raumwinkeln bewirkt werden, daß die Ablesung am Photometer proportional J_0 ist. Derartige Apparate sind von Blondel (Liebenthal, Prakt. Phot. 1907, S. 304), Matthews (ebenda S. 306), Krüß (J. Gas u. Wasser 1908, S. 597), Sahulka (ETZ 1918, S. 253) usw. angegeben, haben aber keine weite Verbreitung gefunden. Von größerer Bedeutung ist die im folgenden beschriebene Ulbrichtsche Kugel.

(291) Unmittelbare Messung des Lichtstroms. Das Kugelphotometer von Ulbricht (ETZ 1900, S. 595; 1907, S. 777). Eine Hohlkugel K (Abb. 114) aus Metall wird innen mit einem mattweißen Anstrich versehen (ETZ 1915, S. 137). Zum Einbringen einer Lichtquelle besitzt die Kugel entweder die obere Öffnung g, oder sie ist längs einer horizontalen oder vertikalen Ebene aufklappbar. Die Kugel hat ferner eine seitliche Öffnung, die mit einem durchscheinenden Milchglas M bedeckt wird. Diese Milchglasplatte wird in die Achse der Photometerbank gebracht, so daß die Achse auf ihrer Mitte senkrecht steht, und durch eine Blende f scharf begrenzt. Jede Stelle der Innenfläche von K empfängt von der Lampe einen Beleuchtungsanteil unmittelbar und einen zweiten infolge ein- oder mehrmaliger Reflexion des Lichtes an der Kugelwand Nach einem von Sumpner angegebenen Gesetz beleuchtet eine diffus leuchtende Stelle der Innenwand einer Kugel die ganze Innenwand gleichmäßig. Daher ist der zweite Beleuchtungsanteil für alle Stellen der Kugelfläche derselbe, welches auch die Verteilung der Lichtausstrahlung sei. Hält man die unmittelbare Beleuchtung durch eine kleine Blende b von der Milchglasplatte M ab, so ist die Beleuchtung der letzteren, die von außen gemessen werden kann, ein Maß für den auf die Innenwand der Kugel treffenden Lichtstrom und damit auch für den von der Lampe ausgestrahlten Lichtstrom. Man eicht das Photometer mit Hilfe einer Glühlampe, deren Lichtstrom bzw. mittlere räumliche Lichtstärke anderweit bestimmt worden ist. Mißt man die Lichtstärke von M mit einer Photometerbank, so gilt nach dem Gesetz der äquivalenten Leuchtfläche (274, H) f als Lichtquelle. Von hier ab und nicht von M ist die Entfernung des Photometers zu rechnen (Z. Beleucht. 1916, S. 43).

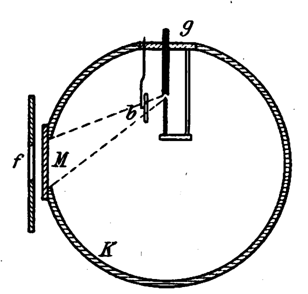


Abb. 114. Kugelphotometer von Ulbricht.

Neuerdings hat v. Voß die Ulbrichtsche Kugel vervollkommnet (ETZ 1917, S. 188, 605).

Photometrie verschiedenfarbigen Lichtes.

(292) Schwierigkeit der Messung. Beim Vergleich der praktisch vorkommenden Lichtquellen im Photometer erhält man verschieden gefärbte Felder und kann im Zweifel sein, wie man die Gleichheit ihrer Beleuchtung beurteilen soll. Geübte Beobachter stellen bei ausgeruhtem Auge gleichwohl stets in derselben Weise ein; doch ist die Empfindlichkeit der Einstellung geringer als bei gleichfarbigen Lichtquellen. Beim Lummer-Brodhunschen Gleichheitsphotometer stellt

man auf Undeutlichkeit der Trennungslinie der beiden verschieden gefärbten photometrischen Felder ein.

(293) Beobachtung des Photometerfeldes durch farbige Gläser. Die verschiedenfarbigen Photometerfelder kann man für das Auge ungefähr gleichfarbig machen, wenn man sie durch ein Farbfilter beobachtet, welches nur einen begrenzten Teil des Spektrums hindurchläßt (Methode von Crova). Entweder verwendet man hierzu ein gelbgrünes Filter, das jene Wellenlängen vorzugsweise durchläßt, für die das Auge am empfindlichsten ist (siehe Pirani, Z. Beleucht. 1913, S. 333), oder man beobachtet durch zwei Filter, deren Farben im Spektrum weit auseinander liegen, z. B. rot und grün (Leonh. Weber), und berechnet aus den beiden Ablesungen das wirkliche Ergebnis. Ziemlicher Lichtverlust ist mit diesen Methoden verbunden. Schwache Lichtströme sind damit nicht zu messen.

(294) Änderung der Farbe einer der beiden Lichtquellen. Haben die beiden Lichtquellen kontinuierliche Spektra und unterscheiden sie sich z. B. nur durch ihre Temperatur (Glühlampen bei verschiedener Belastung), so kann man durch passende Blaufilter vor der Lichtquelle von niedrigerer Temperatur deren Lichtfarbe so ändern, daß sie der anderen Lampe angepaßt ist. Steht das Blaufilter vor der Normal- bzw. Vergleichslampe und wird diese stets gleich beansprucht, so genügt eine einmalige Eichung des Blaufilters, etwa mit dem Flimmerphotometer (296).

Beim Messen von Lichtquellen sehr unterschiedlicher Farbe (z. B. Quecksilberlampe—Kohlenfadenlampe) ist der Farbenunterschied nach dieser Methode schwer zum Verschwinden zu bringen.

(295) Vergleichslichtquelle mit veränderlicher Lichtfarbe. v. Voß versieht eine Vergleichslichtquelle in Gehäuse mit 2 bzw. 3 verschieden gefärbten Glasfiltern von gleicher Lichtdurchlässigkeit. Durch 2 bzw. 3 verstellbare Blenden wird immer die gleiche Lichtmenge freigegeben, die jedoch je nach der Stellung der Blenden verschieden gefärbt ist (Z. Beleucht. 1919, S. 53).

(296) Flimmerphotometer. Bringt man zwei von verschiedenfarbigen Lichtquellen beleuchtete Photometerfelder in rascher Abwechslung vor das Auge, so sieht man ein Flimmern; das Flimmern hört bei einem gewissen Verhältnis der Beleuchtungen auf, und dieses Verhältnis wird als Gleichheit angesehen. Die Mittel, um abwechselnd Flächen vor das Auge zu bringen, die jeweils nur von der einen der zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet werden, sind verschieden. Man verwendet bewegte Blenden (Whitman), bewegte Linsen (Rood, Bechstein), besondere drehbare Photometerkörper, welche so gestaltet sind, daß sie bei der Drehung dem Beschauer bald nur das eine, bald nur das andere Licht zeigen (Krüß, Simmance und Abady). Der mit der Drehvorrichtung (Handantrieb, Uhrwerk, Motor) versehene Photometerkopf wird zur Herstellung gleicher Beleuchtung verschoben wie bei den übrigen Photometern.

Die erforderliche Wechselgeschwindigkeit hängt von der Beleuchtungsstärke ab. Bei zu langsamem Wechsel hört das Flimmern überhaupt nicht auf, bei zu raschem Wechsel verschwindet es auch bei erheblicher Ungleichheit der Beleuchtung. Eine mittlere Geschwindigkeit ist etwa 16 Wechsel in der Sekunde; die Geschwindigkeit muß um so größer sein, je stärker beleuchtet und je größer die beleuchteten Flächen sind. Bei der richtigen Geschwindigkeit findet man nur eine Stelle der Strecke, wo das Flimmern aufhört.

(Siehe Liebenthal, Prakt. Phot. 1907, S. 244—250; Uppenborn-Monasch, Lehrb. d. Phot. S. 195—205.)

Gleichzeitige photometrische und galvanische Messungen.

(297) Messung und Kennzeichnung der Bogenlampen. Als praktischer Effektverbrauch einer Bogenlampe gilt nach den Verbandsvorschriften der Gesamtverbrauch eines Bogenlampenstromkreises, gemessen an der Abzweig-

stelle vom Netz, dividiert durch die Anzahl der Lampen. Bei Angabe dieses Effektverbrauchs ist die Netzspannung mit anzugeben.

Als praktischer spezifischer Effektverbrauch einer Bogenlampe gilt der so gekennzeichnete Effektverbrauch, dividiert durch die Lichtstärke $J_{\smile}$. Zur Bezeichnung dieser Größe dient der Ausdruck W/HK$_{\smile}$ (Watt für 1 Hefnerkerze hemisphärisch) bei *n* Volt Netzspannung. Der Wert HK$_{\smile}$/W bei *n* Volt Netzspannung wird als praktische Lichtausbeute bezeichnet.

Angaben über Wechselstromlampen sind, wenn nichts anderes bemerkt ist, für sinusförmige Kurve der Betriebsspannung und eine Frequenz von 50 Per/s zu verstehen.

In jedem Falle ist anzugeben, in welcher Schaltung die Lampe photometriert und ob induktionsfreier oder induktiver Vorschaltwiderstand angenommen worden ist.

(298) Messung und Kennzeichnung der Glühlampen. Für die Messung und Kennzeichnung der Glühlampen bestehen Vorschriften des VDE, nach denen als Lichtstärke der Glühlampen die mittlere horizontale Lichtstärke angegeben werden soll. (Messung siehe 289.) Da für die Lichterzeugung örtlich begrenzte Maxima der Lichtstärke keine Bedeutung haben, sondern der Lichtstrom bzw. die mittlere räumliche Lichtstärke allein maßgebend ist, war die Kennzeichnung nach der mittleren horizontalen Lichtstärke nur solange zulässig, als alle Glühlampen dieselbe Leuchtkörperanordnung aufwiesen. Diese hatte gleiche Lichtverteilung und gleiches Verhältnis $J_0 : J_h$ (etwa 0,8) zur Folge. Nach Einführung der Spiraldrahtlampen (Vakuum- und Gasfüllung) und anderer Lampen mit abweichender Leuchtkörperform erwies sich die weitere Verwendung von J_h als unhaltbar. Die Glühlampenindustrie traf 1915 die Vereinbarung, bei Gasfüllungslampen als Lichtstärke in erster Linie J_0 anzugeben. Die Bezeichnung der Lampen erfolgt aber nicht nach J_0, sondern nach dem Wattverbrauch (ETZ 1915, S. 216; E. u. M. 1916, S. 413; Z. Beleucht. 1917, S. 136). Die Ausdehnung dieser Kennzeichnung auf Vakuumlampen ist in Aussicht genommen.

(299) Schaltungen bei der Messung von Glühlampen. Die Lichtstärke einer Metalldrahtlampe ändert sich bei normaler Belastung (1,1 W/HK$_h$) mit der 3,6 Potenz der Spannung und der 6,2 Potenz der Stromstärke. Will man daher die Lichtstärke einer Glühlampe mit der größten Genauigkeit bestimmen, die gute Photometer gestatten, so müssen die elektrischen Messungen mit der größten Sorgfalt ausgeführt und die Lampen aus Akkumulatorenbatterien gespeist werden, die daneben nicht beansprucht sind. Präzisionsmessungen erfordern den Gebrauch eines Kompensationsapparates (181) für die Messung der Spannung oder Stromstärke. Die Messung der Spannung ist der Stromstärkemessung vorzuziehen, weil bei gleicher Meßgenauigkeit die Lichtstärke sich weniger ändert. Bei der Spannungsmessung können jedoch durch die Übergangswiderstände am Lampensockel Fehler verursacht werden, die bei Messung der Stromstärke nicht auftreten können.

Sind beide zu vergleichende Lampen in der Spannung gleich oder ungefähr gleich, so können sie durch eine Stromquelle gespeist werden. Etwaige Spannungsschwankungen machen sich dann bei beiden Lampen in gleicher Weise bemerkbar. Abb. 115 gibt die Schaltung nach Strecker wieder, die in die Vorschriften des VDE aufgenommen ist. *S* ist hierbei ein Spannungsmesser für niedrige Werte (eventuell mit Ausschlag nach zwei Seiten), der die Spannungsdifferenz zwischen den Lampen *C* und *B* angibt.

Werden Lampen von sehr verschiedener Spannung mit Wechselstrom gespeist, so kann man die Lampe mit niedriger Spannung über einen kleinen Transformator speisen (z. B. die Vergleichslampe in tragbaren Photometern). Die Spannungsschwankungen im Netz können dann mehrere Prozent betragen, ohne die Genauigkeit der Messung zu beeinträchtigen. Man fange mit den Messungen

erst an, wenn der Transformator die normale Betriebstemperatur angenommen hat.

Zum genauen Konstanthalten der Spannung verwendet Howell eine Brückenschaltung, bei der in zwei einander gegenüberliegenden Zweigen Glühlampen mit positiven Temperaturkoeffizienten (Metallfadenlampen) und in zwei Zweigen Kohlenfadenlampen mit negativen Temperaturkoeffizienten liegen (Proc. Am. Inst. El. Eng. Bd. 31/2, S. 2339).

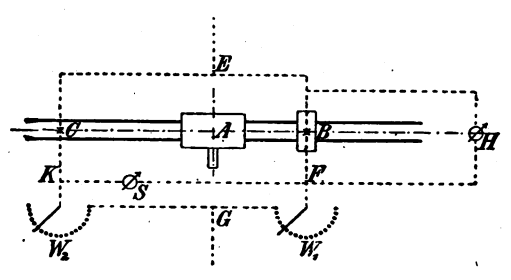


Abb. 115. Schaltung für die Messung von Glühlampen.

Beleuchtung.

(300) Messung der Beleuchtung. Um die von einer oder mehreren Lichtquellen in einer bestimmten Ebene hervorgebrachte Beleuchtung zu messen, bringt man z. B. die Milchglasplatte *b* des Weberschen Photometers (Abb. 106) in die fragliche Ebene; oder man ersetzt den Deckel mit Gipsplatte am Martensschen Photometer (Abb. 108) durch eine Milchglasplatte und bringt sie gleichfalls in die zu untersuchende Ebene. Das Webersche, das Brodhunsche und das Martenssche Photometer können auch nach Beseitigung der Milchglasplatte *b* bzw. des Deckels mit der Gipsplatte auf eine Fläche gerichtet werden, deren Erhellung gemessen werden soll; auf den Abstand von der Fläche kommt es nicht an, wohl aber auf den Winkel, unter dem man die beleuchteten Flächen ansieht; der Winkel zwischen der Achse des Rohres *B* und dem Lot auf der beleuchteten Fläche soll klein sein. Eine neue Eichung wird dann erforderlich. Ferner kann beim Weberschen Photometer das Rohr *K* abgenommen, an die Stelle der Platte *b* eine matte, zerstreut durchlassende Milchglasplatte gebracht und die matte Scheibe der zu messenden Beleuchtung ausgesetzt werden.

Dritter Teil.

Elektrotechnik.

Erster Abschnitt.

Elektromagnete.

(301) Allgemeines. Das Grundelement aller elektrischer Maschinen und Apparate ist der Elektromagnet. Man unterscheidet geschlossene, halb geschlossene und offene, zwei-, vier- und vielpolige Elektromagnete. Die beste Querschnittsform der Schenkel ist der Kreis; ihm nähert sich der Kreuzquerschnitt (Abb. 116), der bei der Herstellung aus Blechen viel angewendet wird. Längliche Querschnitte erfordern einen größeren Aufwand für die Erregerwicklung. Die Wicklung besteht aus Kupfer oder Aluminium in Form von Draht, Band oder Seil. Seil oder Litze kann leicht vierkantig ausgewalzt werden, nützt aber trotzdem den Wickelraum weniger aus, als Draht. Flachkupfer wird häufig hochkantig gewickelt. Bei Aluminium sind Lötstellen zu vermeiden und die Verbindungen durch Verschrauben oder Verschweißen herzustellen. Zur Isolation der Drähte dient meistens einfache, zweifache oder dreifache Umspinnung mit Baumwolle oder Papiergarn. Seide verlangt weniger Wickelraum, ist aber gegen höhere Temperaturen und Feuchtigkeit sehr empfindlich und daher zu verwerfen. Baumwolle verträgt dauernd eine Temperatur von etwa 85° C. Bei höheren Temperaturen nimmt man Asbestumspinnung oder Emaildrähte, d. h. mit einem besonderen Lack überzogene Drähte. Emailisolation vergrößert den Durchmesser des Drahtes nur verschwindend wenig, Baumwollumspinnung vergrößert ihn um 0,3 bis 0,5 mm. Die Wicklung muß für Wechselstromelektromagnete besonders sorgfältig isoliert werden. Wird nämlich eine Windung in sich kurz geschlossen, so wirkt sie wie die Sekundärwicklung eines Transformators und erleidet ohne merkliche Vermehrung der Stromaufnahme des Elektromagnets eine solche Erhitzung, daß schließlich die ganze Spule zerstört wird. Hierbei können unter Umständen durch die trockene Destillation der Isolierstoffe explosive Gase entwickelt werden (vgl. ETZ 1904, S. 184). Die Spulenkasten bestehen aus Preßspahn mit oder ohne Glimmereinlage, aus Ambroin, gepreßter Papiermasse, Eisengummi, Vulkanasbest und bei sehr hohen Spannungen aus Mikanit, Porzellan oder aus fest gewickeltem Papier. Mikanit darf nur bei Luftkühlung verwendet werden, weil Öl seine Isolierfestigkeit außerordentlich beeinträchtigt. Es empfiehlt sich, die Spulen luftgekühlter Transformatoren im Vakuumtrockenofen mit geeigneter Isolationsmasse zu tränken.

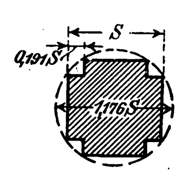


Abb. 116. Kreuzquerschnitt, günstigste Abmessungen.

(302) Erwärmung. Nach § 18 der Verbandsnormalien sollen die Temperaturzunahmen, falls die Temperatur der Umgebung 35° C nicht überschreitet, folgende Werte in °C nicht überschreiten:

bei Verwendung von	an ruhenden Gleichstrom-Magnetwicklungen	an Transformatoren	an umlaufenden Wicklungen oder in Nuten eingebetteten Wechselstromwicklungen
ungetränkter Baumwolle	50	50	40
getränkter Baumwolle	60	60	50
Papier	60	60	60
Baumwolle oder Papier in Öl	—	70	—
Email, Asbest, Glimmer und deren Präparate	80	80	80
Baumwolle mit Füllmasse innerhalb der Nuten	—	—	60

Für den Widerstand R gilt die Formel, wenn ϑ die Temperatur in °C ist, $R_{warm} = R_{kalt} \cdot (1 + \alpha\,(\vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt}))$.

Der Temperaturkoeffizient α ist bei reinen Metallen ungefähr gleich 0,004; genauer kann man für Kupfer nach den Verbandsnormalien

$$\alpha = \frac{1}{235 + \vartheta_{kalt}}$$

setzen.

Die Temperatur ist am höchsten bei den in der Mitte der Spulen liegenden Drähten und nimmt sowohl nach oben und unten als auch nach außen und nach dem Kern zu ab. Zu große Wicklungstiefe ist daher zu vermeiden. Unterteilung der Erregerspulen hat für die Abkühlung nur Zweck, falls durch äußere Mittel Luftzug hervorgebracht wird. Die Wärmeleitung ist bedeutend größer in der Ebene der Bleche, als senkrecht dazu. Eine starke Magnetisierung beeinträchtigt die Wärmeleitung. Als abkühlende Oberfläche wird vielfach die äußere Mantelfläche voll und die am Kern liegende Mantelfläche halb eingesetzt; alsdann kann man setzen

$$\varDelta\vartheta = \vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt} = 500\,\frac{\text{Verlust in Watt}}{\text{Oberfläche in cm}^2}.$$

Die Temperaturgrenzen beziehen sich auf die sogenannte Endtemperatur, d. h. diejenige Temperatur in °C, über die hinaus bei normaler Dauerbelastung eine Steigerung praktisch nicht wahrgenommen werden kann.

Bei konstanter Stromwärmeleistung $I^2 R$ und konstanter Temperatur des umgebenden Mittels (Luft, Öl) steigt die Temperaturzunahme $\varDelta\vartheta$ der Spule nach einem Exponentialgesetz, nach Unterbrechung des Stromkreises fällt sie nach einem solchen. Es gilt für die

Erwärmung $\varDelta\vartheta = \varDelta\vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\lambda t}\right)$, daraus $t = \frac{2{,}3026}{\lambda} \log_{10} \frac{\varDelta\vartheta_{max}}{\varDelta\vartheta_{max} - \varDelta\vartheta}$,

Abkühlung $\varDelta\vartheta = \varDelta\vartheta_{max} \cdot e^{-\lambda t}$, daraus $t = \frac{2{,}3026}{\lambda} \log_{10} \frac{\varDelta\vartheta_{max}}{\varDelta\vartheta}$. Darin ist $\tau = \frac{1}{\lambda}$ die Zeitkonstante der Erwärmung. Setzt man mit Müller in die Erwärmungsgleichung zwei Wertepaare $t_1, \varDelta\vartheta_1$ und $t_2, \varDelta\vartheta_2$ ein und setzt $t_2 = 2t_1$, so erhält man daraus unmittelbar $\varDelta\vartheta_{max} = \varDelta\vartheta_1^2/(2\varDelta\vartheta_1 - \varDelta\vartheta_2)$. Es genügen also zwei Messungen zur Bestimmung von $\varDelta\vartheta_{max}$.

Die Zeit zur Erreichung der Endtemperatur nimmt mit den linearen Abmessungen zu und mit der Wirksamkeit der Kühlmethode ab. Für die Erwärmung ist die Art des Betriebes maßgebend. Man unterscheidet (§ 4 der Maschinennormalien):

a) Dauerbetrieb, bei dem die Belastbarkeit beliebig lange Zeit,

b) kurzzeitigen Betrieb, bei dem die Belastbarkeit nur während einer vereinbarten Zeit innegehalten werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme die zulässigen Grenzen überschreitet.

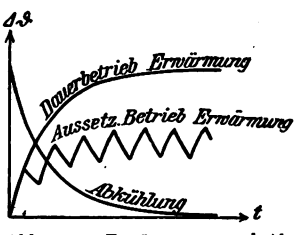


Abb. 117. Erwärmungs- und Abkühlungskurven.

Die zulässige Beanspruchung im Falle b) ermittelt man, indem man die Erwärmungs- und die Abkühlungskurve zeichnet und die den jeweiligen Betriebszuständen entsprechenden Abschnitte nach Abb. 117 zusammensetzt.

Literatur: Oelschläger, E., ETZ 1900, S. 1058. — Ott, Forschungshefte d. V. D. I., Heft 35/36; ETZ 1908, S. 194. — Schmalz, ETZ 1908, S. 188. — Goldschmidt, ETZ 1908, S. 886. — Amsler, ETZ 1910, S. 831. — Ossanna, ETZ 1910, S. 542; El. u. Maschb. 1909, S. 489. — Arnold, ETZ 1909, S. 172. — Müller, El. u. Maschb. 1915, S. 21. — Brückmann, Erwärmung d. Motoren bei aussetzendem Betrieb. Diss. Hannover 1908. — Binder, Über Wärmeübergang auf ruhige und bewegte Luft, sowie Lüftung und Kühlung der Maschinen. Diss. München 1911. Halle, W. Knapp. — Bachmann, Die therm. Grundlagen d. Ölkühlung elektr. App., insbesondere von Transformatoren. Diss. Dresden 1914.

(303) **Formeln für die Wicklung der Spulen.** Es seien die Längen in cm, die Querschnitte in cm², das Volumen in cm³, der spezifische Widerstand in Ω cm ausgedrückt. H (Abb. 118) sei die Höhe, T die Tiefe der Wicklung, δ der Drahtdurchmesser des blanken, δ' der des umsponnenen Drahtes, q und q' die entsprechenden Drahtquerschnitte, l_m die mittlere Länge einer Windung, so ist die Windungszahl

$$m = \frac{HT}{\delta'^2}, \qquad (1)$$

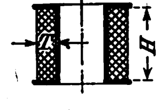


Abb. 118. Spule.

die Drahtlänge

$$l = m l_m = \frac{H T l_m}{\delta'^2} = \frac{V}{\delta'^2}\,\text{cm}, \qquad (2)$$

da $H T l_m$ gleich dem Volumen V des Wicklungsraumes ist.

Ferner der Widerstand R, wenn ϱ der spezifische Widerstand in Ω cm

$$R = \frac{\varrho l}{q} = \frac{4\varrho V}{\pi \delta^2 \delta'^2}\,\text{Ohm}. \qquad (3)$$

Unterscheiden sich δ und δ' wenig voneinander, so kann man $\delta = \delta' = \delta_0$ setzen, woraus

$$\delta_0 = \sqrt[4]{\frac{4\varrho V}{\pi R}}\,\text{cm} \qquad (4)$$

in erster Annäherung zu berechnen ist, wenn V und R gegeben sind. Die Klemmenspannung ist bei der Stromwärmeleistung W Watt, weil $P^2/R = W$, also $P = \sqrt{RW}$,

$$P = \frac{2}{\delta\delta'}\sqrt{\frac{\varrho V}{\pi} W}\,\text{Volt}, \qquad (5)$$

woraus

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2}{P}\sqrt{\frac{\varrho V}{\pi} W}}\ \text{cm}. \tag{6}$$

Die Durchflutung $\Delta = mI$ ergibt sich aus $I = P/R$ mit (1), (5) und (3)

$$\Delta = mI = \frac{1}{2}\frac{\delta}{\delta'} HT \sqrt{\frac{\pi W}{\varrho V}} = \frac{1}{2}\frac{\delta}{\delta'} S \sqrt{\frac{\pi W}{\varrho V}}\ \text{AW}, \tag{7}$$

wenn S der Wicklungsquerschnitt in cm² ist. Die Durchflutung ist daher wenig abhängig von der Drahtstärke, ist direkt proportional der Wurzel aus dem Leistungsverbrauch und umgekehrt proportional der Wurzel aus dem spezifischen Widerstande. Mit Rücksicht auf die Erwärmung kann nur ein bestimmtes W zugelassen werden, das durch Versuch oder aus der Oberfläche unter Berücksichtigung der durch die Umgebung der Spule bedingten Abkühlungsverhältnisse zu bestimmen ist. Für Meßinstrumente sind mindestens 20 cm²/W, für andere Zwecke bei Dauereinschaltung 20 cm²/W, bei aussetzendem Betrieb etwa 10 bis 50 cm²/W zu rechnen, falls nicht künstliche Kühlung vorhanden ist.

(304) Der magnetische Kreis. Vgl. (29), (30), (34).
Näherungsweise kann man nach Hopkinson

$$0{,}4\pi mI = \mathfrak{H}_0 l_0 + \mathfrak{H}_1 l_1 + \mathfrak{H}_2 l_2 + \cdots$$

setzen, worin $\mathfrak{H}_0$, $\mathfrak{H}_1$, $\mathfrak{H}_2$ ... die als konstant angenommenen mittleren Feldstärken in den einzelnen Teilen, l_1, l_2 ... die mittleren Längen dieser Teile in cm bedeuten. Mit Hilfe der Beziehung $\mathfrak{H} = \mathfrak{B}/\mu$ erhält man

$$mI = \frac{\mathfrak{H}_0}{0{,}4\pi}\cdot l_0 + \sum_{n=1}^{n=n}\frac{\mathfrak{B}_n}{0{,}4\pi\cdot\mu_n}\cdot l_n$$

$\mathfrak{H}_0/0{,}4\pi$ ist die auf 1 cm Länge zur Herstellung des Induktionsflusses in der Luft erforderliche Durchflutung (800 AW für je 1000 Gauß), $\mathfrak{B}/0{,}4\pi\mu$ die zur Herstellung des Induktionsflusses im Eisen auf 1 cm Länge erforderliche Durchflutung in AW. Letztere ist aus Magnetisierungskurven zu entnehmen, die in der Regel die Werte $\mathfrak{B}/0{,}4\pi\mu$ als Abszissen, $\mathfrak{B}$ als Ordinaten besitzen. Solche Kurven müssen für das jeweilig zu verarbeitende Material aufgenommen werden. Mittlere Werte ergeben sich aus Abb. 119; genauere Werte für zahlreiche Eisensorten s. (32). Für größere Querschnitte gilt der Satz näherungsweise unter der Annahme einer mittleren Induktion für den ganzen Querschnitt und unter Zugrundelegung einer mittleren Länge des magnetischen Kreises.

Beispiel: Elektromagnet.

Teil des Elektromagnets	Material	Magnet. Induktion $\mathfrak{B}$ in Gauß	Spez. Durchflutung in AW/cm	Länge in cm	Durchflutung in AW
2 Schenkel	Stahlguß	14000	10	40	400
2 Lufträume	Luft	9000	7200	1,6	11500
Joch	Gußeisen	7000	30	50	1500
Anker	Bleche	8000	3	30	90
					13490

(305) Hysterese und Wirbelströme (31), (33), (99). Bei Wechselstrommagneten treten in dem vom Induktionsfluß durchsetzten Eisen Verluste durch Hysterese V_h und durch Wirbelströme V_w, in nicht magnetischen dem Induktionsflusse aus-

gesetzten Leitern Wirbelströme V_w auf. Die Verluste durch Hysterese werden genau nach dem Gesetz von Warburg (33), angenähert nach der Regel von Steinmetz durch

$$V_h = \eta \cdot f\, \mathfrak{B}_{max}^{1,6} \text{ Erg/s} \cdot \text{cm}^3$$

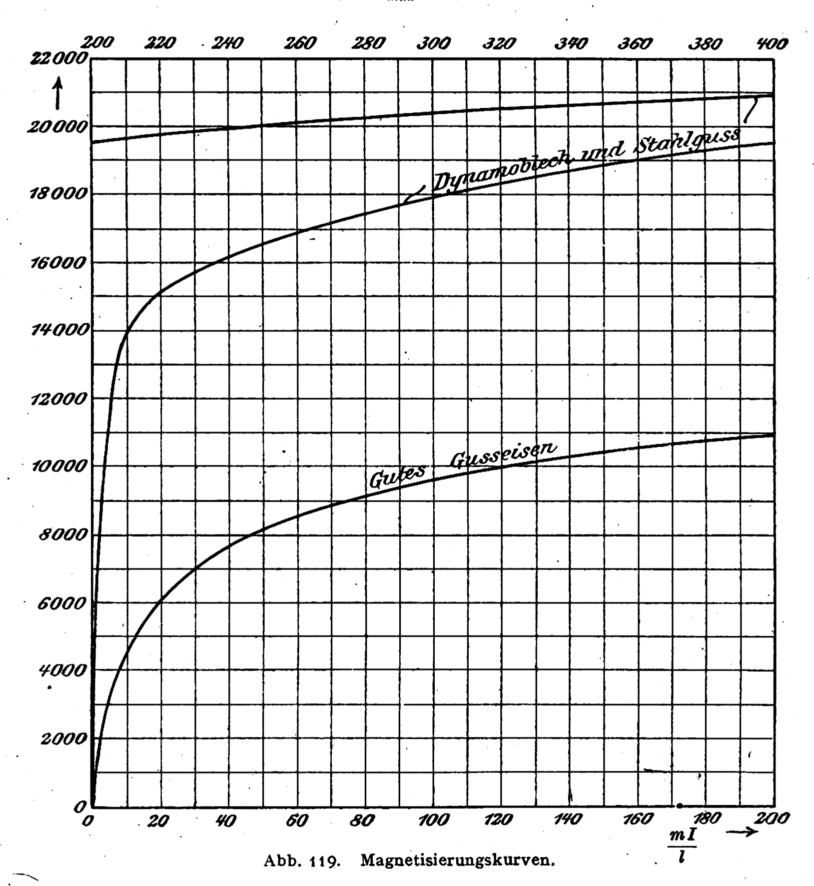


Abb. 119. Magnetisierungskurven.

oder nach R. Richter

$$V_h = f\left(\eta_1 \mathfrak{B}_{max} + \eta_2 \mathfrak{B}_{max}^2\right) \text{ Erg/s} \cdot \text{cm}^3$$

berechnet. Die Wirbelstromverluste sind

$$V_w = \beta f^2 \mathfrak{B}_{max}^2 \text{ Erg/s} \cdot \text{cm}^3.$$

η ist von dem Verhältnis des effektiven Mittelwertes zum arithmetischen Mittelwert, dem Formfaktor F, unabhängig, β proportional mit $F\delta^2$, wenn δ die Blechstärke. V ist mit $10^4 \cdot \gamma$ zu dividieren (γ = Dichte = 7,7 gr/cm³ bei Eisenblechen), wenn die Verluste in W/kg ausgedrückt werden sollen. Für praktische Zwecke

stellt man die Gesamtverluste $V_h + V_w$ in Kurven dar, Abb. 120, die den Verlust in W/kg für bestimmte Frequenzen f in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion angeben.

(306) Verlustziffer. Die Größe der Gesamtverluste, ausgedrückt in Watt und bezogen auf 1 kg Eisen, $f = 50$ Per/s und 30° C, wird bei $\mathfrak{B} = 10000$ Gauß die kleine Verlustziffer, bei $\mathfrak{B} = 15000$ Gauß die große Verlustziffer genannt (225). Sie werden nach den Normalien des VDE mit dem Epsteinschen Apparat bei sinusförmigem Strom gemessen. Die kleine Verlustziffer beträgt im Mittel für gewöhnliche Bleche 3,70 W/kg bei 0,5 mm und 2,90 W/kg bei 0,3 mm Blechstärke; für legierte Bleche 2,75 W/kg bei 0,5 mm und 2,50 W/kg bei 0,3 mm Blechstärke.

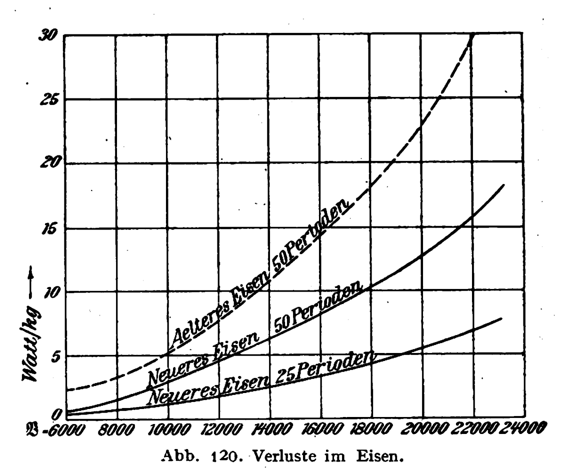


Abb. 120. Verluste im Eisen.

(307) Trennung der Verluste. Trägt man in rechtwinklige Koordinaten die Werte

$$V/f = \eta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{1,6} + \beta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{2} \cdot f$$

für ein konstantes $\mathfrak{B}_{max}$ als Funktion von f auf, so erhält man eine Gerade. Der Abschnitt auf der Ordinatenachse ist gleich $\eta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{1,6}$, die Tangente des Neigungswinkels mit der Abszissenachse gleich $\beta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{2}$. Hieraus können η und β bestimmt werden (242). Bei der Veränderung von f ist darauf zu achten, daß sich der Formfaktor F nicht ändert. η liegt bei Dynamoblechen zwischen 0,0012 und 0,0018 Erg/cm³(Per/s) · Gauß; β/δ^2 (δ in mm) ist bei gewöhnlichen Blechen etwa gleich $1{,}6 \cdot 10^{-6}$, bei legierten Blechen etwa gleich $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ Erg/cm³(Per/s)² Gauß². Eindeutige Werte erhält man nur, wenn man sinusförmige Spannungen verwendet.

(308) Unterteilung des Eisens. Der Eisenkörper der Wechselstrommagnete ist zu unterteilen, um die Entstehung von Wirbelströmen infolge der Ummagnetisierung möglichst zu beschränken. Man stellt den Körper für 50 Per/s aus Blechen von 0,5 mm bis 0,3 mm, für Hochfrequenz aus sehr dünnen Blechen bis 0,07 mm Stärke her, die auf Spezialmaschinen einseitig mit festem Seidenpapier von 0,03 mm Stärke beklebt werden. Die Endbleche werden häufig stärker, bis zu 2 mm stark gewählt; zum Zusammenhalten dienen durch Papier- oder Mikanitröhren isolierte Niete oder Schraubenbolzen. Die Papierisolation ist allein nicht zuverlässig genug, daher werden häufig in Abständen von 1—2 cm Einlagen von Zeichenpapier in die Kerne gebracht. Sofern die Kerne bearbeitet werden, muß ein Verschmieren der Flächen vermieden werden.

Die Ebene der Bleche muß senkrecht zur Richtung der induzierten EMK gelegt werden. Beim Übertritt der Induktionslinien von einem Blech in ein benachbartes werden Wirbelströme erzeugt. Man vermeidet sie möglichst durch Anordnung sehr großer Übergangsquerschnitte, z. B. durch breite Überlappung. Metallene Spulenkasten und Flansche sind so aufzuschneiden, daß in ihnen nicht Ströme um den Magnetkern herumlaufen können. Bei alledem bleibt doch ein Rest von Wirbelströmen, der entmagnetisierend wirkt und die Wirkung der Erregung abschwächt. Bei der Ummagnetisierung wird das Eisen in Vibration versetzt und brummendes Geräusch verursacht. Das Geräusch ist bei mäßiger Induktion verschwindend, besonders wenn der magnetische Kreis ganz eisengeschlossen ist, oder wenn seine Teile fest miteinander verschraubt sind.

(309) Spulenfluß. Die Strombahn einer in sich geschlossenen Windung kann man zur Begrenzung einer im übrigen beliebig gestalteten Fläche wählen, die die Windungsfläche heißt. Sie schneidet den gesamten Induktionsfluß, der die Windung durchdringt. Ebenso kann man sich die Windungen einer Spule als Begrenzung einer Fläche denken; diese ist die Windungsfläche der ganzen Wicklung. Der gesamte durch sie hindurchgehende Induktionsfluß ist der S p u l e n f l u ß Ψ (Modell einer solchen Wicklung von E m d e , vgl. Elektrotechnik und Maschinenbau 1912, S. 976). Man ersetzt diese Windungsfläche in der Regel durch so viele Flächen, wie Windungen vorhanden sind, indem man jede Windung als in sich geschlossen ansieht. Werden die einzelnen Windungen von den „Windungsflüssen" $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \ldots$ durchsetzt, so ist die EMK

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} 10^{-8} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \ldots)\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Geht durch alle m Windungen derselbe Induktionsfluß, so ist

$$\Psi = m\,\Phi \text{ und } e = -m\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Wird Ψ durch den eigenen Strom der Spule erzeugt, so ist

$$\Psi = \Sigma\,\Phi = m\,\Phi = L\,I \cdot 10^{+8},$$

wenn L die Selbstinduktivität in Henry, I die Stromstärke bedeutet. L ist proportional mit m^2. Bei größerer Sättigung ist

$$L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} = m\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} 10^{-8}, \text{ woraus } L = m\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}I} 10^{-8}$$

folgt. L hängt dann von der Sättigung ab.

Bei Wechselstrom ist die effektive Stromstärke

$$I = \frac{P}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}},$$

worin P die effektive Spannung. Häufig kann mit großer Annäherung R vernachlässigt und

$$I = \frac{P}{2\pi f L}$$

gesetzt werden. Elektromagnete für Wechselstrom verlangen daher bei gleicher Durchflutung und gleicher Spannung weniger Windungen und stärkeren Strom als solche für Gleichstrom.

(310) Streuung. Weil es magnetische Isolatoren nicht gibt, muß mit der Abweichung eines Teiles des Induktionsflusses von dem gewünschten Wege gerechnet werden. Dieser Teil des Induktionsflusses heißt Streuung. Man unterscheidet also Gesamtfluß, nützlichen oder Hauptfluß und Streufluß. Zur Vermeidung der

Streuung wird die Wicklung am besten dort angebracht, wo der Induktionsfluß ausgenutzt werden soll, im allgemeinen also so nahe wie möglich am Luftraum.

Der Streufluß kann nach Hopkinson berechnet werden, wenn man den Verlauf der Streulinien näherungsweise durch Überlegung oder Versuch bestimmt. Für einen magnetischen Kreis *AYBZA* (Abb. 121 bis 123) sind folgende Gesetze nützlich: Der Kreis bestehe in seinen einzelnen Teilen aus beliebigem verschiedenartigem Material und sei mit Windungen umgeben, von denen jede von einem Strom beliebiger Stärke und Richtung durchflossen ist. Jedoch sei *MN* eine Symmetrieebene. Zwischen *A* und *B* und zwischen *C* und *D* befinde sich ein Streufluß.

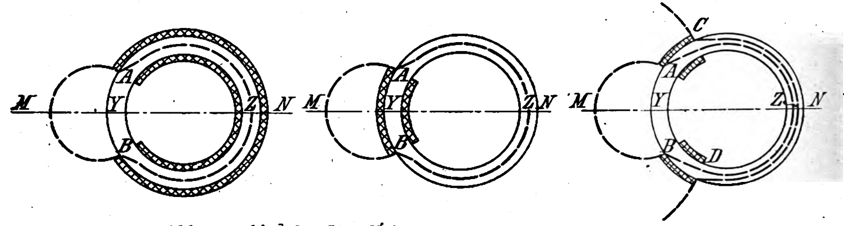


Abb. 121 bis 123. Streulinien eines magnetischen Kreises.

1. Die magnetische Potentialdifferenz Π_{AB} zwischen *A* und *B* ist gleich dem Überschuß der mit 0,4 π multiplizierten Durchflutung $\Delta_{BA} = (m\,I)_{BA'}$ auf dem Teile *BZA* über die zur Magnetisierung dieses Teiles erforderliche MMK H_{BA}, Abb. 121, $\Pi_{AB} = 0{,}4\pi\Delta_{BA} - H_{BA}$.

2. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen *A* und *B* ist gleich dem Überschuß der zur Magnetisierung des Teiles *AYB* erforderlichen MMK H_{AB} über die mit 0,4 π multiplizierte Durchflutung auf diesem Teile, Abb. 122. $\Pi_{AB} = H_{AB} - 0{,}4\pi\Delta_{AB}$.

3. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen *C* und *D* ist gleich der Potendialdifferenz zwischen *A* und *B* vermehrt um den Überschuß der zur Magnetisierung der Teile *CA* und *BD* erforderlichen MMKe H_{CA} und H_{BD} über die mit 0,4 π multiplizierten Durchflutungen auf diesen Teilen, Abb. 123. $\Pi_{CD} = \Pi_{AB} + (H_{CA} + H_{BD}) - 0{,}4\,\pi(\Delta_{CA} + \Delta_{BD})$.

Die Durchflutungen sind positiv zu rechnen, wenn sie einen Induktionsfluß in der Richtung *AYBZA* erzeugen. Der Induktionsfluß in einer Röhre des Streuflusses ist gleich der magnetischen Potentialdifferenz zwischen zweien ihrer Punkte, dividiert durch ihren magnetischen Widerstand zwischen den beiden Punkten.

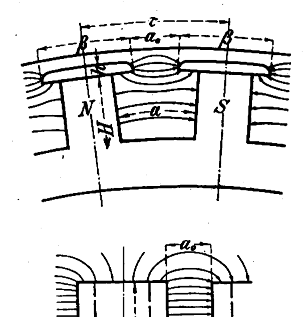


Abb. 124 und 125. Streuung an den Feldmagneten.

Man teile wie in Abb. 124 und 125 den ganzen Streufluß in einzelne Röhren und berechne den Streufluß jeder Röhre nach den angegebenen Gesetzen. Die Summe ergibt dann den ganzen Streufluß.

(311) Zugkraft der Magnete. Zwei einander gegenüberstehende Pole üben (27), (101) die Zugkraft

$$\mathfrak{K} = \frac{\mathfrak{B}^2 S}{8\,\pi \cdot 981 \cdot 10^3}\ \text{kg*}$$

aufeinander aus, wenn *S* die Polfläche in cm² ist.

Bei $\mathfrak{B} = 5000$ Gauß ist der Zug gleich 1,014 kg*/cm², d. i. rund 1 kg*/cm². Der Abstand der Polflächen voneinander ist zunächst gleichgültig, doch ist zu beachten, daß die Induktionslinien sich ausbreiten, wenn man die Polflächen voneinander entfernt; S wird größer, $\mathfrak{B}$ kleiner, die Zugkraft kleiner. Bemerkenswert ist, daß Pole, besonders solche mit Polschuhen, eine starke Anziehung nach dem Joch zu erhalten. Beträgt z. B. die Fläche am Joch 20 × 20 cm², am Polschuh 31 × 20 cm², so ist die Zugkraft am Joch für $\mathfrak{B} = 14\,000$ Gauß gleich 3180 kg*, an der Polfläche bei 10 % Streuung und $\mathfrak{B} = 9000$ Gauß gleich 2400 kg*, der Pol wird daher mit 1140 kg* gegen das Joch gedrückt.

(312) Hubmagnete[1]. Elektromagnete mit entweder geradlinig fortschreitender oder drehender Bewegung des Ankers (Abb. 126 u. 127) finden vielfach Anwendung zur Lüftung der Bremsen an Windwerken, zur Bewegung von Fernschaltern und selbsttätigen Schaltern, sowie zum Ein- und Ausschalten von Widerstandsstufen (als sog. Stromschützen). Konstante Kraft längs des ganzen Hubes ist nicht erforderlich, doch muß der Übertragungsmechanismus der Arbeitsweise des Magnets angepaßt sein. Die Größe des Hubmagnets wird zweckmäßig nach der Arbeit bemessen, die er leisten kann. Bei Gleichstrom wird der Topfmagnet (Abb. 126) viel angewendet. Die Stromwärme darf meistens groß sein (intermittierender Betrieb). Bei Drehstrom nimmt man drei nebeneinanderstehende, durch ein Joch miteinander verbundene Schenkel (Abb. 128). Da die Zugkraft jedes Schenkels pro-

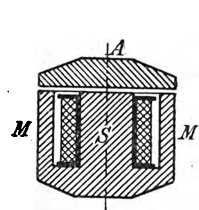




Abb. 126. Topfmagnet.

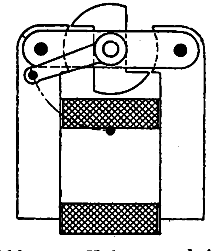


Abb. 127. Hubmagnet mit Drehbewegung.

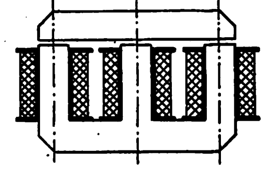


Abb. 128. Drehstrommagnet.

portional dem Quadrat des Magnetismus ist, so ist die gesamte Zugkraft annähernd während des ganzen Verlaufs einer Periode konstant, weil in jedem Augenblick $i_1^2 + i_2^2 + i_3^2$ konstant ist. Bei einphasigem Wechselstrom benutzt man, um dasselbe zu erreichen, eine sogenannte Kunstphase, d. h. man nimmt ebenfalls einen mehrspuligen Magnet und speist die einzelnen Spulen mit phasenverschobenen Wechselströmen. Auch wird das Prinzip des Induktionsmotors benutzt. Alle Wechselstrommagnete brauchen für gleiche Arbeit und gleiche Spannung einen bedeutend stärkeren Strom als die Gleichstrommagnete, weil die Wicklung der Selbstinduktion wegen mit viel weniger Windungen ausgeführt werden muß.

(313) Drosselspulen. Wechselstrommagnete werden benutzt, um überschüssige Spannung ohne großen Leistungsverlust abzudrosseln, z. B. in Bogenlampenkreisen, ferner zur Erdung des Nullpunktes von Wechselstromanlagen und Unterdrückung des Erdschlußstromes (Petersen, ETZ 1919, S. 5), zur Verbesserung des

[1]) Kolben, ETZ 1901, S. 148. — Vogel, ETZ 1901, S. 175. — Beneke, ETZ 1901, S. 542. — Dietze, ETZ 1092, S. 131. — Emde, ETZ. 1908, S. 717. Zur Berechnung der Elektromagnete. El. u. M. 1906, S. 945. — Euler, Untersuchung eines Zugmagneten für Gleichstrom. Diss. Berlin 1911. Julius Springer. — Steil, Untersuchungen über Solenoide und über ihre praktische Verwendbarkeit für Straßenbahnbremsen. Diss. Berlin 1911.

Parallelbetriebes (472), in der Meßtechnik und im Laboratorium. Die effektive EMK ist, sinusartiger Verlauf vorausgesetzt:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f m S \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot f m S \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} \text{ Volt,}$$

wenn f die Frequenz, m die Windungszahl, S der Eisenquerschnitt ist. Die Klemmenspannung weicht von diesem Wert nur sehr wenig ab.

Vektordiagramm der Drosselspule.[1] Es werde angenommen, daß alle Größen sinusförmig sind, d. h. nach einem Sinusgesetz verlaufen. Der Vektor für den Induktionsfluß Φ werde beliebig festgelegt (Abb. 129). Rechtwinklig zu ihm liegt um 90° nacheilend verschoben der Vektor der durch Φ induzierten EMK E (denn wenn $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ ist, so ist $e = -\omega m \Phi_0 \cos \omega t \cdot 10^{-8}$, e ändert sich also wie ein negativer Cosinus, wenn sich Φ wie ein positiver Sinus ändert). Wenn der Eisenschluß vollkommen ist, so hat der Stromvektor etwa die Lage OA (50° Voreilung vor Φ), denn OA muß mit E einen stumpfen Winkel einschließen, weil im Eisen Verluste auftreten. Ist ein Luftspalt vorhanden, so tritt zu OA noch die für die Durchmagnetisierung der Luft erforderliche Stromkomponente AB parallel mit Φ, weil in der Luft keine Verluste auftreten; der Vektor des Gesamtstromes ist daher OB. Der Spannungsverlust IR hat dieselbe Phase wie I, die Spannung ergibt sich daher aus $P = E \frown IR$, indem man $-IR$ an den Vektor E anträgt. Die Phasenverschiebung zwischen E und I ist ϑ, die zwischen P und I ist φ. Beide Winkel sind stumpf. $EI \cos \vartheta$ stellt die Verluste im Eisen, $PI \cos \varphi$ die Gesamtverluste dar, dabei ist $PI \cos \varphi = EI \cos \vartheta + I^2 R$. Bei konstantem Φ wachsen die Verluste im Eisen wegen der Wirbelströme in der Nähe des Luftspaltes ein wenig; wenn der Luftspalt größer gewählt wird. Sieht man hiervon ab, so bewegt sich der Endpunkt B des I-Vektors auf einer Parallelen zu Φ. Will man stumpfe Winkel vermeiden, so klappe man I um 180° herum. Man erhält dann die spitzen Phasenverschiebungswinkel ϑ' und φ'. Der Spannungsverlust IR ist in der Regel sehr klein im Vergleich mit E und P. Die Phasenverschiebung φ' beträgt bei gut eisengeschlossenem Kreise 40° bis 45°, bei großem Luftspalt bis über 80°.

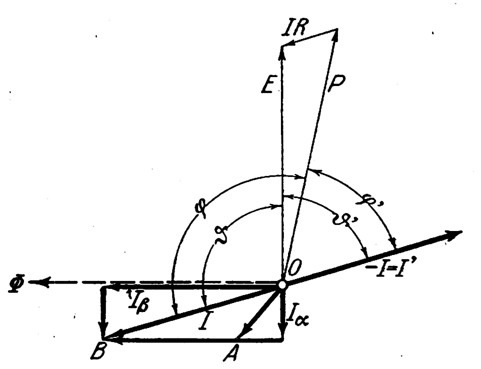


Abb. 129. Vektordiagramm der Drosselspule.

(314) Verzerrung der Stromkurve. Wenn die Spannung nach einem Sinusgesetz verläuft, so verläuft die EMK annähernd nach einem Sinusgesetz, weil der

[1]) Das Ohmsche Gesetz wird für den Stromerzeuger gewöhnlich in der Form $E = P + RI$, für den Stromverbraucher in der Form $P = E + RI$ geschrieben. Da aber in vielen Maschinen die Generatorwirkung stetig in die Motorwirkung übergeht, so empfiehlt es sich, bei theoretischen Untersuchungen das Gesetz immer in derselben Form zu schreiben. Im Folgenden ist bei allen Diagrammen die Form $E = P + RI$ gewählt. Nennt man den Strom positiv, wenn E und I gleich gerichtet, also $E > P$ ist, wie beim Generator, so erhält man beim Motor, wo $E < P$ ist, einen negativen Strom. Mithin erscheinen beim Generator die innere Leistung EI und die äußere Leistung PI als positive, beim Stromverbraucher als negative Größen. Im Vektordiagramm fallen E und P zusammen, wenn RI verschwindet; E und P schließen mit I spitze Winkel ein, wenn elektrische Leistung erzeugt wird, und stumpfe Winkel, wenn elektrische Leistung verbraucht wird.

Spannungsverlust nur einen geringen Bruchteil der Spannung beträgt, folglich verläuft dann auch der Induktionsfluß annähernd nach einem Sinusgesetz. Die Stromkurve, die man leicht aus der Hystereseschleife ableiten kann, ist dann aber bei eisengeschlossenem Kreise stark verzerrt. Man ersetzt sie durch eine „äquivalente Sinuskurve“, d. h. eine Kurve, von demselben Effektivwert und solcher Phasenverschiebung gegen die EMK, daß ihr dieselbe Leistung entspricht. Ist aber ein Luftspalt vorhanden, so folgt die für ihn erforderliche Komponente der Stromstärke (AB in Abb. 129) dem Sinusgesetz, wenn Φ sinusartig verläuft. Mithin nähert sich der Verlauf des Gesamtstromes um so mehr einem Sinusgesetz, je größer der Luftspalt gewählt wird. (Ebenso wie ein Luftspalt wirkt bei den Transformatoren eine induktionsfreie Belastung.)

(315) Berechnung der Drosselspulen. Gegeben sind Drosselspannung und Stromstärke. Wird bei gegebener Netzspannung die Abdrosselung einer bestimmten Spannung verlangt, so ist zur Ermittelung der Drosselspannung die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Drosselspannung und zwischen Netzspannung und Drosselspannung zu beachten. Die Stromstärke wird durch Wahl der passenden Länge l des Luftwegs eingestellt, Abb. 130. Vernachlässigt man den magnetischen Widerstand im Eisen und nimmt man den Querschnitt als konstant an, so gelten folgende Gleichungen:

$$0{,}4\pi\sqrt{2}mI = \mathfrak{B}l \quad \text{und} \quad \sqrt{2}E = 2\pi f m S \mathfrak{B} 10^{-8}$$

und daraus das Luftvolumen V_L

$$V_L = Sl = 0{,}4\frac{IE}{f\mathfrak{B}^2}10^8.$$



Abb. 130. Drosselspule mit verstellbarem Luftschlitz.

Für die scheinbare Leistung EI ist also das Volumen V_L des Luftweges bestimmend. Damit sich der Induktionsfluß nicht zu sehr ausbreitet, mache man l klein im Verhältnis zu S und lege den Luftspalt möglichst in die senkrecht zur Längsachse stehende Symmetrieebene der Spulen. Der Luftspalt wird durch Preßspan, Eisenfilz oder dergleichen ausgefüllt, und die Eisenteile werden fest verspannt, um Brummen zu verhüten. Drosselspulen mit offenem magnetischen Kreis sind wegen Streuung in den äußeren Raum, wegen Auftretens von Wirbelströmen in den Enden und wegen der Schwierigkeit der Justierung nicht zu empfehlen. Die Windungszahl ergibt sich aus obigen Gleichungen nach Wahl der Induktion, der Drahtquerschnitt aus der zulässigen Stromwärme und dem vorgeschriebenen Leistungsverlust.

Liegen Querschnitt und Windungszahl fest, so ergibt sich von selbst die Bemessung des erforderlichen Wickelraumes der Spulen, die Länge des Eisenkerns, die Form und Länge der Jochstücke. Die Berechnung der Verluste im Eisen gibt ein Urteil darüber, ob die gewählten Größenverhältnisse beibehalten werden können, oder ob Abänderungen erwünscht sind. Zur genauen Einstellung der bei gegebener Klemmenspannung gewünschten Stromstärke oder der bei gegebener Stromstärke gewünschten Klemmenspannung wird die Länge der Luftstrecken verändert.

(316) Überspannungen. Bei Reihenschaltung einer Drosselspule mit einem Kondensator können an beiden Apparaten beträchtliche Überspannungen auftreten. Bemerkenswert ist, daß bei derselben Spannung, besonders bei eisengeschlossenem Kern, zwei verschiedene Gleichgewichtszustände möglich sind, der eine bei geringer Spannung am Kondensator und erhöhter an der Drosselspule, der andere bei hohen Überspannungen an beiden (Martienssen, ETZ 1910, S. 204; Phys. Zeitschr. 1910, S. 448. — Petersen, ETZ 1915, S. 353; 1916, S. 148, 252. — Biermanns, Archiv f. El. 1915, S. 345. — Görges, ETZ 1918, S. 101).

Zweiter Abschnitt.

Transformatoren.

(317) Benennungen. Transformatoren schlechthin sind Apparate zur Umwandlung elektrischer Wechselstrom-Leistung in elektrische Wechselstrom-Leistung ohne bewegte Teile, insbesondere zur Herabsetzung oder Erhöhung der Spannung, während die Frequenz unverändert bleibt. Sie bestehen aus zwei oder mehr durch einen oder mehrere magnetische Kreise miteinander verketteten Wicklungen. Die die elektrische Leistung vom Netz empfangende Wicklung heißt die primäre, die übrigen Wicklungen die sekundären. Das Verhältnis der Windungszahlen zweier durch einen magnetischen Kreis verketteten Spulen nennt man ihr Übersetzungsverhältnis. Ein Transformator hat den Verbrauch an Leistung N_1 bei der Spannung P_1 und gibt die Leistung N_2 bei der Spannung P_2 ab; die „Abgabe" N_2 ist gleich der „Aufnahme" N_1 vermindert um die Leistungsverluste im Transformator. Im belasteten Transformator sind die Stromstärken in der Primär- und Sekundärwicklung den Spannungen annähernd umgekehrt proportional, die Leistungsfaktoren sind in beiden Wicklungen angenähert gleich groß.

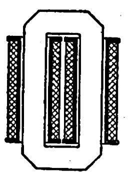


Abb. 131. Zweischenkliger Kerntransformator.

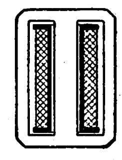


Abb. 132. Einschenkliger Transformator.

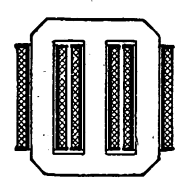


Abb. 133. Drehstromtransformator, Säulen in einer Ebene.

Man unterscheidet Transformatoren für Einphasen-, Zweiphasen-, Drehstrom usw., und solche für Übergang von Zweiphasenstrom in Drehstrom oder von Drehstrom in Zweiphasenstrom. Transformatoren für Einphasenstrom haben entweder nur einen einfach geschlossenen magnetischen Kreis (Abb. 131) oder seltener einen mehrfach, meist zweifach geschlossenen (Abb. 132).

Drehstrom wird entweder durch drei Einphasentransformatoren transformiert oder durch Drehstromtransformatoren mit drei Schenkeln, die jetzt fast stets in einer Ebene parallel nebeneinander gestellt und oben und unten durch Joche miteiander verbunden werden, Abb. 133. Die Unsymmetrie in den Induktionsflüssen ist ziemlich belanglos.

(318) Der magnetische Kreis der Transformatoren wird gewöhnlich in Eisen geschlossen, um den Leerlaufstrom, d. h. den Magnetisierungsstrom möglichst herabzumindern. Transformatoren mit kurzen Lufträumen kommen vereinzelt für

besondere Zwecke vor, besonders zur Kompensierung der Kapazität von ausgedehnten Kabelnetzen.

Bei der Herstellung des eisengeschlossenen magnetischen Kreises ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß die für sich hergestellten Wicklungsspulen nachträglich über die Eisenkerne geschoben werden können. Entweder werden die einzelnen Teile des Blechkörpers an den erforderlichen Unterbrechungsstellen bearbeitet und mit stumpfem Stoß zusammengesetzt; bei dieser Anordnung sind die einzelnen Teile zur Verhütung von Brummen sehr fest aufeinander zu pressen. Oder man verbindet die einzelnen Teile durch Überblattung, indem man die Kerne aus Paketen von je etwa 10 längeren und 10 kürzeren Blechen abwechselnd zusammensetzt und die so gebildeten Zinken ineinandergreifen läßt (308). Überblattung bietet mehrere Vorteile; man bekommt eine sehr einfache Zusammensetzung des Eisenkörpers, und kann den erforderlichen Magnetisierungsstrom auf die Hälfte bis auf den dritten Teil des bei stumpfem Stoß erforderlichen Betrages herabsetzen. Kreuzen sich die Bleche zweier Pakete bei stumpfem Stoß, so muß die Wirbelstrombildung durch Zwischenlegen von Papier an der Stoßstelle eingeschränkt werden, was freilich nur auf Kosten einer Erhöhung des Magnetisierungsstromes möglich ist.

(319) Aufbau. Vgl. die Beispiele ausgeführter Transformatoren, Abb. 324 bis 328 S. 385 ff. Die Transformatoren erhalten eine Bewehrung aus Schmiedeeisen oder Gußeisen, durch das die Teile des Eisenkerns zusammengehalten und die Spulen gestützt werden; ferner häufig einen Mantel oder ein völlig geschlossenes Gehäuse. Kleinere und mittelgroße Transformatoren werden bei mäßig hohen Spannungen meistens mit natürlicher Luftkühlung versehen. Da alle Teile ruhen, ist der Luftzug nicht sehr stark; man muß daher große Abkühlungsflächen schaffen und dafür sorgen, daß die kalte Luft ungehindert zuströmen, die erwärmte ungehindert abfließen kann. Gelochte Bleche drosseln die Luft auch bei reichlicher Lochung stark, es müssen daher Grundplatte und Deckel des Transformators so gestaltet werden, daß die Luft möglichst frei hindurchstreichen kann. Nur bei kleinen Leistungen (bis etwa 5 kW) dürfen die Wicklungen fest aufeinander und auf dem Eisenkern liegen; bei größeren Leistungen müssen auch die Oberfläche des Eisenkerns und die inneren Oberflächen der Spulen von der kühlenden Luft bestrichen werden.

Transformatoren mit künstlicher Luftkühlung werden mit abgeschlossenen Gehäusen versehen, durch die mit einem Gebläse reine trockene, am besten durch ein Filter angesaugte Luft, getrieben wird.

(320) Öltransformatoren. Die Transformatoren werden vielfach der besseren Isolation und der Abkühlung wegen in Öl gesetzt. Bei Spannungen über 30 000 V werden fast ausschließlich Öltransformatoren angewendet. Wegen der größeren Wärmekapazität des Öles vertragen sie vorübergehend höhere Überlastungen als luftgekühlte Transformatoren; bei Dauerbetrieb sind sie den Transformatoren mit natürlicher Luftkühlung deshalb überlegen, weil Öl die vom Transformator erzeugte Wärme viel leichter aufnimmt, als Luft. Kleinere Transformatoren erhalten einfache Gußkasten. Besser ist die Kühlung, wenn die Gußkasten mit äußeren und inneren Rippen zum Wärmeaustausch versehen werden. Für größere Leistungen verwendet man autogen geschweißte Wellblechkasten. Bei großen Transformatoren muß das Öl künstlich gekühlt werden. Entweder wird in dem Raume über dem Transformator eine vom Kühlwasser durchflossene Kühlschlange angeordnet (Abb. 325) — diese Anordnung ist wegen der Bildung von Kesselstein weniger zu empfehlen — oder der Ölkessel wird mit einem Kühlmantel umgeben, oder das Öl wird durch eine Umlaufpumpe aus dem Ölkessel durch Kühlschlangen, die in einem besonderen Wasserbehälter untergebracht sind, und zurück in den Ölkessel gedrückt. Vgl. hierzu Abb. 326, S. 386.

Zur Füllung verwendet man ein leichtflüssiges, absolut säure- und wasserfreies Öl. Meistens wird russisches Mineralöl verwendet, dessen Gefrierpunkt

unter -20° C und dessen Entflammungspunkt über 150° C liegt. W. Brauen empfiehlt Harzöl, das durch Destillation von Kolophonium gewonnen wird und gereinigt hellgelb ist. Damit das Öl nicht Wasser aus der Luft aufnimmt, wird die Oberfläche des Ölspiegels möglichst klein gemacht oder auch im obersten Teile des Kastens eine Schale mit Chlorkalzium angebracht, oder der Ölkessel vollkommen gefüllt und durch ein Steigrohr mit einem Ausgleichgefäß verbunden, vgl. Abb. 326, S. 386. Durchschnittlich muß das Öl alle ein bis zwei Jahre untersucht werden, weil sich besonders bei hoher Temperatur Schlamm absetzt und Säuren bilden. Die Feuchtigkeit wird dem Öl durch Filtrieren in einem Fließpapierdruckfilter entzogen. Man erkennt die Feuchtigkeit an dem Knattern des Öles, wenn ein glühender Eisendraht hineingetaucht wird. Das Öl soll frei von Beimengungen sein. Schwefel, der besonders gefährlich ist, wird an der Schwärzung eines Kupferdrahtes im erwärmten Öl erkannt. Bei der Verdampfungsprobe soll das Öl nach 8stündiger Erwärmung auf 100° höchstens 0,2 % an Gewicht verlieren. Die Durchschlagfestigkeit beträgt zwischen konzentrischen Zylindern (innerer Zylinder 1—5 cm Durchmesser) 90—110 kV/cm. Vor dem Inbetriebsetzen des Transformators wird das Öl filtriert und bei 120° C längere Zeit gekocht, wobei es dauernd zwischen dem Kocher und dem Ölkessel in Umlauf gehalten wird. Man erreicht dadurch zugleich die Austrocknung des Transformators. (Vgl. Petersen, Hochspannungstechnik, Stuttgart 1911; Klingenberg, Bau großer Elektrizitätswerke, Berlin, Springer, 1913; Brauen, ETZ 1914, S. 145.)

(321) Bewicklung der Transformatoren. Für die Bewicklung wird Leitungskupfer nach den Normalien des VDE oder neuerdings vielfach Aluminium genommen. Da der spezifische Widerstand des Aluminiums sich zu dem des Kupfers fast genau wie $\sqrt{3}:1$ verhält, so ist die Durchflutung bei Aluminiumwicklung nach (303) Gl. (7) das $\sqrt{1/\sqrt{3}}$-fache = dem 0,76-fachen der Durchflutung bei Kupferwicklung, wenn die Stromwärmeleistung dieselbe ist. Man muß daher die Wicklung oder besser den Eisenkörper und die Wicklung größer wählen, und zwar in den linearen Abmessungen um etwa 6 Hundertstel.

Man ordnet die Wicklungen stets so an, daß jeder Schenkel sowohl einen Teil der Primärwicklung wie einen Teil der Sekundärwicklung erhält. Die Spulen werden entweder konzentrisch übereinander geschoben — in diesem Falle ist es der Isolation wegen meist zweckmäßiger, die Niederspannung nach innen, die Hochspannung nach außen zu legen — oder man ordnet die Spulen nebeneinander an, wobei Primär- und Sekundärspulen miteinander abwechseln. Häufige Unterteilung ist dabei zur Verringerung der Streuung notwendig. Für die Herstellung der Wicklung gilt im allgemeinen dasselbe wie für die Herstellung der Wicklung gewöhnlicher Elektromagnete (vgl. 301).

Die Wicklung kann bei kleinen Transformatoren — bis höchstens 5 kW — direkt auf den mit Öltuch, Preßspan oder dergleichen isolierten Kern aufgebracht werden. Kupferaufwand und Streuung fallen dann besonders gering aus. In der Regel und bei größeren Transformatoren immer stellt man besondere Spulenkasten her, bei kleineren Leistungen gemeinsame Kasten für beide Wicklungen, bei größeren Leistungen und höheren Spannungen getrennte Kasten für die Wicklungen. Die Spulenkasten können auch weggelassen werden, wenn man dünndrähtige Spulen durch Umschnürungen in sich festigt und mit Hüllen von ausreichender Isolierfestigkeit umgibt. Wicklungen aus Flachkupfer besitzen in der Regel Halt genug und bedürfen lediglich isolierender Zwischenstücke, die einfach eingelegt werden. Die Querschnitte werden so gewählt, daß in radialer Richtung vom Eisenkern aus die Kupferabmessung möglichst gering bleibt (Kupferband), weil sich andernfalls oft die Stromwärme infolge ungleichförmiger Verteilung der Stromstärke über den Kupferquerschnitt — Stromverdrängung (398) — (auch Wirbelströmen im Kupfer zugeschrieben) bedeutend erhöht, vgl. ETZ 1903, S. 674. Spulen mit vielen Windungen sind mit Rücksicht auf die Spannung zwischen benachbarten Drähten zu unterteilen.

(322) Isolation. Bei der Herstellung der Transformatorspulen ist ebenso wie bei der Wicklung von Wechselstrommagneten (301) auf sorgfältige Isolation der einzelnen Windungen zu sehen. Da eindringende Überspannungswellen besonders leicht die Isolation zwischen den ersten, den Klemmen zunächst gelegenen Windungen durchschlagen, so empfiehlt es sich, diese besonders stark zu isolieren. Öl und andere zum Ausgießen benutzte isolierende Massen erfüllen ihren Zweck nur dann, wenn aus dem Innern alle Luftblasen entfernt sind. Geringer Gehalt an Wasser setzt die Isolierfähigkeit des Öles bedeutend herab. Man ordnet daher unter dem Öl besonders nahe dem Boden des Ölkastens Funkenstrecken an, die unter Hochspannung stehen, und deren Durchschlagen ein Warnungssignal auslöst.

Zur Verminderung der Spannung zwischen der Hochspannungswicklung und der Niederspannungswicklung sowie dem Eisenkörper zerlegt Dessauer (ETZ 1918, S. 373) den Transformator in einen Mittel- und zwei Außentransformatoren, deren Hochspannungswicklungen sämtlich in Reihe geschaltet sind, während die Niederspannungswicklungen der Außentransformatoren von besonderen Hilfstransformatoren („Beanspruchungstransformatoren") gespeist werden und mit den Endpunkten der Hochspannungswicklung des Mitteltransformators verbunden sind.

(323) Den **Hochspannungsklemmen** ist besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Besonders leicht geben die Gleitfunken zu Störungen Anlaß, die ihren Weg längs der Oberfläche einer isolierenden Schicht nehmen, unterhalb deren die spannungführende Leitung liegt. Von den Siemens-Schuckert-Werken wird die Ausführungsklemme von Nagel (El. Bahn. u. Betr. 1906, S. 275ff.) angewendet, deren Isolierrohr abwechselnd aus Porzellan- und aus Metallrohren von nach außen abnehmender Länge besteht, so daß das elektrische Feld längs der äußeren Oberfläche von der Klemme bis zu dem geerdeten Eisenkörper, in dem die Klemme sitzt, und daher auch das elektrische Feld zwischen Durchführungsbolzen und Eisenkörper in radialer Richtung durch die Porzellanrohre möglichst konstant bleibt. In der von der AEG benutzten Ausführungsklemme (ETZ 1910, S. 118) von Kuhlmann ist das Porzellan nur der Träger der Klemme, die Luft der Hauptisolator. Die Klemme ist zu diesem Zwecke in der Mitte, wo sie in dem geerdeten Eisenkörper sitzt, weit ausgebaucht.

(324) Sicherheitsvorkehrungen. Nach den Errichtungsvorschriften des VDE § 25 muß bei Transformatoren in besonderer Weise verhindert werden, daß ein Übertritt von Hochspannung in Stromkreise für Niederspannung sowie das Entstehen hoher Spannungen in den letzteren vorkommt. Man kann hierzu besondere Spannungssicherungen benutzen, die bei Überschreitung der normalen Spannung durchschlagen werden (Durchschlagssicherung) und der hohen Spannung einen Weg zur Frde gewähren. Sie zeigen aber einige Nachteile, derentwegen sie neuerdings nur noch selten angewandt werden. (683).

Nach § 25d müssen Transformatoren außerhalb elektrischer Betriebsräume entweder allseitig in geerdete Metallgehäuse eingeschlossen oder in besonderen Schutzverschlägen untergebracht werden. Nach e sollen an jedem Transformator, mit Ausnahme von Meßtransformatoren, Vorrichtungen angebracht sein, die gestatten, das Gestell gefahrlos zu erden.

(325) Übersetzungsverhältnis. In einer Wicklung von m Windungen, die denselben Induktionsfluß $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ umschließen, wird nach (313) die EMK

$$e = -\omega m \Phi_0 \cos \omega t \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

induziert. Hierin ist $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz in Per/2πs, f die Frequenz in Per/s. Die effektiven Mittelwerte der induzierten EMKe sind daher

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f m_1 \Phi_{10} \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot f m_1 \Phi_{10} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f m_2 \Phi_{20} \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot f m_2 \Phi_{20} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

In gut eisengeschlossenen Transformatoren ist bei Leerlauf $\Phi_1 = \Phi_2$, daher $E_1/E_2 = m_1/m_2$. Aus dem Diagramm, Abb. 136, folgt, daß das Übersetzungsverhältnis m_1/m_2 dann auch gleich dem Verhältnis der Klemmenspannungen bei Leerlauf und angenähert gleich dem umgekehrten Verhältnis der Stromstärken bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung ist. Man unterscheidet Transformatoren mit festem und solche mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis.

Transformatoren mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis. Man kann das Übersetzungsverhältnis ändern:

a) durch Zu- und Abschalten von Windungen mittels eines nach Art der Zellenschalter für Akkumulatoren gebauten Windungsschalters. Der Widerstand oder die Drosselspule zwischen den beiden Bürsten ist dabei so zu bemessen, daß der Kurzschlußstrom in der ab- oder zuzuschaltenden Windungsgruppe den normalen Wert der Stromstärke nicht überschreiten kann. Bei Verminderung der primären Windungszahl wächst die Induktion im Eisen, man darf die Windungszahl also nicht zu weit verringern. Eine Veränderung der sekundären Windungszahl ist in weitesten Grenzen zulässig. Man beachte aber, daß die übrig bleibenden Windungen möglichst symmetrisch über den ganzen magnetischen Kreis verteilt sein müssen, damit örtliche Streuungen vermieden werden;

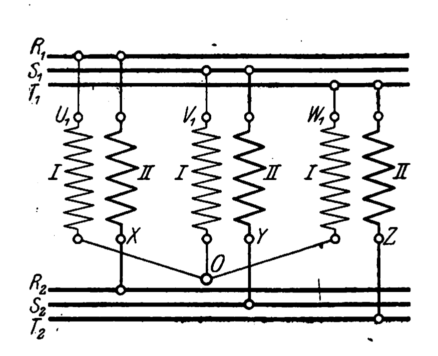


Abb. 134. Schaltung des Drehtransformators.

Abb. 135. Diagramm des Drehtransformators.

b) durch Entfernung der Sekundärspulen von den Primärspulen. Die Sekundärspulen liegen über den Primärspulen und können in die Höhe gehoben werden. Dazu müssen die Eisenschenkel länger als üblich gemacht werden. Durch die Entfernung der Spulen voneinander wird die Streuung vergrößert und infolge davon die EMK der Sekundärspule verringert. Die Streuung und daher die Verringerung der EMK wächst mit der Stromstärke. Vgl. ETZ 1906, S. 1200.

c) durch Verdrehung der Spulen gegeneinander. Solche Apparate gestatten eine stetige Veränderung der Sekundärspannung, haben aber des Luftspaltes wegen einen starken Magnetisierungsstrom. Besondere Bedeutung haben die Drehtransformatoren für Mehrphasenstrom erlangt.

(326) Drehtransformator. Vgl. Abb. 328, S. 387. Er ist wie ein Induktionsmotor für Mehrphasenstrom gebaut, der mit einer selbstsperrenden Drehvorrichtung (Schnecke und Rad) versehen ist oder aus zwei Teilen besteht, deren Drehmomente gegeneinander gerichtet sind (Kübler). Der drehbare Teil trägt gewöhnlich die Primärwicklung und erhält seinen Strom durch biegsame Zuleitungen, der Ständer trägt die Sekundärwicklung. Die Schaltung als Zusatztransformator stellt Abb. 134 dar. U_1, V_1, W_1 können auch mit R_2, S_2, T_2 verbunden werden. Um den Transformator abzuschalten, schaltet man zunächst

Widerstände vor oder hinter die Primärwicklungen und schließt letztere dann kurz. Man kann dann auch die Sekundärwicklungen kurz schließen und darauf die Wicklungen vom Netz abtrennen. (Vgl. DRP 247048, Siemens-Schuckertwerke, und DRP 289164, Brown, Boveri u. Cie., ETZ 1909, S. 1217.) Das Diagramm zeigt Abb. 135. Es seien $A_1 B_1$, $B_1 C_1$ und $C_1 A_1$ die drei Primärspannungen. Die Sekundärspannungen $A_1 A_2$, $B_1 B_2$, $C_1 C_2$ des Drehtransformators sind gleich groß und konstant, weil sie durch ein konstantes Drehfeld erzeugt werden, ihre Phasen werden jedoch durch die Stellung des drehbaren Teiles bestimmt. Die resultierenden Spannungen, die an den Sammelschienen R_2, S_2, T_2 auftreten, sind daher $A_2 B_2$, $B_2 C_2$, $C_2 A_2$. Durch Verdrehung des Drehtransformators um 180° elektrische Grade kann man daher die sekundäre Netzspannung um $2\sqrt{3} \times$ Spannung eines Zweiges der Sekundärwickelung des Transformators verändern.

(327) Streuung. Tatsächlich weichen die Induktionsflüsse, Φ_1 und Φ_2, voneinander ab, und zwar um so mehr, je stärker die Ströme in den Wicklungen sind. Ihr Unterschied ist die Streuung. Bei Wechselstrom ist die Streuung, sofern man die Induktionsflüsse durch Vektoren darstellt, gleich der vektoriellen Differenz von Φ_1 und Φ_2.

Streuungskoeffizienten (vgl. Emde, Die Arbeitsweise der Wechselstrommaschinen, J. Springer, Berlin, S. 19ff.). Hopkinson definierte die Streuung einer Dynamomaschine, indem er den größten Induktionsfluß durch die Feldmagnete Φ_1 mit dem größten Induktionsfluß durch den Anker Φ_2 verglich, und führte den Streuungskoeffizienten

$$\nu = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

ein. ν ist daher größer als 1. Der Wert $1/\nu$ ist eine dem Wirkungsgrad analoge Zahl.

Erweiterung von Blondel. Setzt man die Induktionsflüsse in zwei Spulen I und II gleich Φ_1' und Φ_2', wenn nur Spule I von einem Strome durchflossen ist, und gleich Φ_1'' und Φ_2'', wenn nur Spule II von einem Strome durchflossen ist, so folgt aus

$$e_1' = -\frac{d}{dt}(m_1 \Phi_1') \cdot 10^{-8} = -\frac{d(L_1 i_1)}{dt} \qquad e_2' = -\frac{d}{dt}(m_2 \Phi_2') \cdot 10^{-8} = -\frac{d(M i_1)}{dt}$$

$$m_1 \Phi_1' \cdot 10^{-8} = L_1 i_1 \quad \text{und} \quad m_2 \Phi_2' \cdot 10^{-8} = M i_1$$

und ebenso $\quad m_2 \Phi_2'' \cdot 10^{-8} = L_2 i_2 \quad$ und $\quad m_1 \Phi_1'' \cdot 10^{-8} = M i_2$.

Dann ist nach Blondel $\quad \nu_1 = \frac{\Phi_1'}{\Phi_2'} = \frac{m_2 L_1}{m_1 M}, \qquad \nu_2 = \frac{\Phi_2''}{\Phi_1''} = \frac{m_1 L_2}{m_2 M}$.

Heyland setzt die Verluste in den Zähler, den Induktionsfluß selbst in den Nenner, er bekommt daher die relativen Streuungsverluste. Es ist dann

$$\tau_1 = \frac{\Phi_1' - \Phi_2'}{\Phi_2'} = \nu_1 - 1 \qquad \tau_2 = \frac{\Phi_2'' - \Phi_1''}{\Phi_1''} = \nu_2 - 1,$$

τ_1 und τ_2 sind im allgemeinen kleine Zahlen.

Behn-Eschenburg geht von dem allgemeinen Satze aus, daß stets

$M^2 < L_1 L_2$ ist. Er setzt daher $M^2 = (1 - \sigma) L_1 L_2$,

woraus $\quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2} \qquad \sigma = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2}{(1+\tau_1)(1+\tau_2)} \approx \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 + \tau_1 + \tau_2}$

folgt.

Ist die Bedingung, daß derselbe Induktionsfluß durch alle Windungen einer Spule hindurchgeht, nicht erfüllt, so hat man für $m\Phi$ den Spulenfluß $\Psi = \sum_{n=1}^{n=m} \Phi_n$ zu setzen. Man kann hieraus $\Phi_{mittel} = \Psi/m$ bilden und mit Φ_{mittel} wie vorher rechnen.

(328) Spulenfaktoren. Diesen Festsetzungen liegt stillschweigend die Voraussetzung zugrunde, daß die beiden Wicklungen ungefähr gleiche Größe und ähnliche Formen besitzen. Diese Voraussetzung ist bei den normalen Transformatoren und den Induktionsmotoren annähernd erfüllt. Bei den Wechselstromkommutatormotoren haben jedoch die Wicklungen auf dem Ständer und dem Läufer meistens stark voneinander abweichende Formen. Die Kommutatorwicklung ist immer gleichmäßig über den Umfang verteilt, die Wicklung auf dem Ständer aber häufig in wenigen Nuten untergebracht. Derselbe eine geometrische Fläche durchdringende Induktionsfluß erzeugt dann in zwei Wicklungen, deren größte Windung jene Fläche umschließt, auch bei gleichen Windungszahlen verschieden große EMKe. Geht man von zwei flachen Spulen gleicher Gestalt und Größe mit gleich viel Windungen aus, und setzt man die Streuung gleich Null, so erzeugt ein Strom, der in der einen der beiden Spulen fließt, gleich große EMKe in beiden Spulen. Sondert man nun die Hälfte der Windungen der primären Wicklung zu einer besonderen Spule ab und läßt diese beständig kleiner werden, so wird ihr Einfluß auf den Induktionsfluß und die EMKe immer geringer und verschwindet im Grenzfalle ganz. Die EMK der primären Spule ist daher kleiner als die der sekundären und beträgt im Grenzfalle nur noch die Hälfte der letzteren, weil dann nur ein Transformator überbleibt, dessen Windungszahlen sich wie 1 : 2 verhalten. Schreibt man aber den Unterschied in den EMKen zweier Spulen von gleicher Windungszahl der Streuung zu, so muß man in dem geschilderten Falle von negativer Streuung sprechen. Dies tun Rogowski und Simons (ETZ 1908, S. 535). Statt mit Φ_{mittel} rechnen sie mit dem Induktionsfluß Φ_{max} der Windung, die von allen den größten Induktionsfluß umschlingt, indem sie

$$\Phi_{mittel} = F \cdot \Phi_{max}$$

setzen. Die Spulenfaktoren F haben für jede Art der Spulen und des Induktionsflusses einen besonderen Wert. Es sei Φ_{12}' der nur von i_1 herrührende Induktionsfluß, der auch mit allen oder einem Teil der Windungen der Sekundärspule verkettet ist, Φ_{1s}' der nur von i_1 herrührende Induktionsfluß, der nur mit allen oder einem Teil der Windungen der Primärwicklung verkettet ist. Φ_{21}'' und Φ_{2s}'' seien die entsprechenden nur von i_2 herrührenden Flüsse. Sie setzen nun

$$e_1' = -m_1 \cdot \frac{d}{dt}(F_1 \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}') \cdot 10^{-8} = -\frac{d}{dt}(L_1 i_1)$$

$$e_2' = -m_2 \cdot \frac{d}{dt}(F_{12} \Phi_{12}') \cdot 10^{-8} \qquad = -\frac{d}{dt}(M i_1)$$

woraus
$$\nu_1 = \frac{m_2 L_1}{m_1 M} = \frac{F_1 \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}'}{F_{12} \Phi_{12}'}$$

und ebenso
$$\nu_2 = \frac{m_1 L_2}{m_2 M} = \frac{F_2 \Phi_{21}'' + F_{2s} \Phi_{2s}''}{F_{21} \Phi_{21}''}.$$

Weiter
$$L_1 = \frac{m_1}{m_2} M + S_1 \qquad L_2 = \frac{m_2}{m_1} M + S_2.$$

Daraus endlich

$$L_1 = m_1 \frac{F_1 \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}'}{i_1} 10^{-8} \qquad L_2 = m_2 \frac{F_2 \Phi_{21}'' + F_{2s} \Phi_{2s}''}{i_2} 10^{-8}$$

$$M = m_2 \frac{F_{12}\Phi_{12}'}{i_1} 10^{-8} \qquad M = m_1 \frac{F_{21}\Phi_{21}''}{i_2} 10^{-8}$$

$$S_1 = m_1 \frac{(F_1 - F_{12})\Phi_{12}' + F_{1s}\Phi_{1s}'}{i_1} 10^{-8} \qquad S_2 = m_2 \frac{(F_2 - F_{21})\Phi_{21}'' + F_{2s}\Phi_{2s}''}{i_2} 10^{-8}.$$

Eine der beiden Streuungsgrößen S_1 und S_2 kann negativ, das zugehörige ν also kleiner als eins sein.

(329) **Berechnung der Streuung.** Bei ineinanderliegenden Spulen bildet der zwischen der inneren und der äußeren Spule hindurchgehende Induktionsfluß die Streuung. Die innere Spule erzeugt in diesem Raum überhaupt kein Feld oder nur ein so schwaches, daß man es für praktische Zwecke vernachlässigen kann. Die MMK für den Streufluß ist daher bei ineinanderliegenden Spulen $0{,}4\,\pi\, m_a I_a$ wenn I_a die Stromstärke in der äußeren Spule ist. Als Querschnitt kann man den Ring ansehen, der den Raum zwischen den Wicklungen und nach jeder Seite noch ein Drittel der Wicklungstiefe umfaßt, als Länge, die für die Berechnung des magnetischen Kreises in Betracht kommt, die Spulenhöhe, vermehrt um einen Zuschlag, dessen Größe sich nach der Konstruktion richtet und etwa 50 % (bei langen Spulen) bis 100 % (bei kurzen Spulen) beträgt. Es schließt sich nämlich ein großer Teil der Streulinien durch die Eisenjoche, und der Rest findet in dem umgebenden Raume durch Ausbreitung einen so großen Querschnitt, daß der magnetische Widerstand dort verschwindend klein wird.

Bei nebeneinanderliegenden Spulen geht der Streufluß zwischen den primären und sekundären Spulen hindurch. Man kann als MMK $\frac{1}{2} \cdot 0{,}4\,\pi \cdot (m_1 I_1 + m_2 I_2)$ annehmen, als Widerstand des Streuflusses den Pfad um eine Primärspule herum. Hierbei ist wieder zu beachten, daß sich innerhalb der Spule Eisen befindet, außen ebenfalls oder der Querschnitt sehr groß ist; es kommen also wesentlich die Teile des Pfades zwischen den Spulen in Betracht, wobei wieder ein Teil der Spulendicke (je etwa 1/6) hinzuzuschlagen ist. Die Pfadlänge ist daher die doppelte radiale Abmessung vom Eisen bis zum Außenrand der Spulen, vermehrt um einen Zuschlag, der sich nach der Konstruktion richtet. Bei den Endspulen ist der magnetische Widerstand etwa halb so groß.

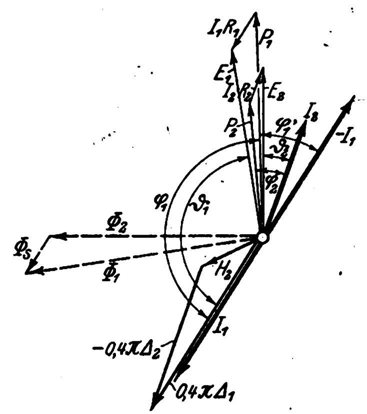


Abb. 136. Vektordiagramm des normalen Transformators.

(330) **Transformatordiagramm bei konzentrischen Spulen und eisengeschlossenem magnetischen Kreis** (Abb. 136). Der die Sekundärwicklung durchsetzende Induktionsfluß Φ_2 erzeugt die EMK E_2 in der Sekundärwicklung, gegen die die Stromstärke I_2 die Phasenverschiebung ϑ_2 besitzt. Zieht man den Ohmschen Spannungsverlust $I_2 R_2$ von E_2 ab, so erhält man die sekundäre Klemmenspannung P_2. Zwischen I_2 und P_2 besteht die Phasenverschiebung φ_2. Zur Erzeugung von Φ_2 ist die MMK H_2 erforderlich. Da nun $0{,}4\pi(\Delta_1 \hat{+} \Delta_2) = H_2$ sein muß, wenn Δ die Durchflutung ist, so findet man leicht $0{,}4\pi\Delta_1$ und durch Division mit $0{,}4\pi m$ die primäre Stromstärke I_1. Addiert man zu Φ_2 die Streuung Φ_s, die gleichphasig mit I_1 angenommen werden kann, so erhält man Φ_1 und senkrecht dazu die in der Primärwicklung erzeugte EMK E_1. Die primäre Klemmenspannung

P_1 ist gleich $E_1 \widehat{-} I_1 R_1$. Die Vektoren P_1 und I_1 schließen einen stnmpfen Winkel, die Vektoren P_2 und I_2 einen spitzen Winkel miteinander ein. Die Primärwicklung verbraucht, die Sekundärwicklung erzeugt elektrische Leistung.

Spannungsverlust im Transformator. Rechnet man alle Größen der Primärwicklung auf die Windungszahl der Sekundärwicklung um, so hat man I_1 mit m_1/m_2, E_1, P_1 und die Spannungsverluste im Primärkreis mit m_2/m_1 zu multiplizieren. Die umgerechneten Größen sollen durch einen Strich gekennzeichnet werden. Man kann sich nun denken, daß E_1' die Summe von zwei EMKen ist, nämlich von E_2 und E_s', wobei E_s' durch Φ_s erzeugt wird. Man hat dann

$$P_1' = P_2 \widehat{+} I_2 R_2 \widehat{+} E_s' \widehat{-} I_1' R_1' \quad \text{oder} \quad P_1' \widehat{-} P_2 = I_2 R_2 \widehat{-} I_1' R_1' \widehat{+} E_s'.$$

Der Spannungsabfall setzt sich also aus den Spannungsverlusten durch Ohmschen Widerstand und aus dem induktiven Spannungsverlust E_s' zusammen. Da I_1 und I_2 bei größerer Belastung nahezu 180° Phasenverschiebung gegeneinander haben, so können $I_1' R_1'$ und $I_2 R_2$ algebraisch addiert und ihre Summe gleich E_w' parallel zu I_2 gezeichnet werden, während E_s' senkrecht auf I_2 zu zeichnen ist, Abb. 137. Der induktive Spannungsverlust ist um so geringer, je geringer der

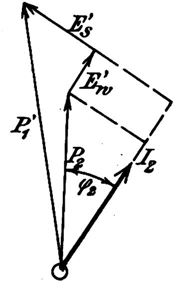


Abb. 137. Vektordiagramm der Spannungsverluste im normalen Transformator.

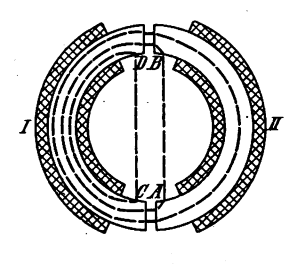


Abb. 138. Streuung im allgemeinen Transformator.

Querschnitt des Streuflusses ist. Hochspannungstransformatoren haben daher wegen des größeren Abstandes der Spulen der Primär- und der Sekundärwicklung voneinander und infolge der erforderlichen dickeren Isolierschichten einen höheren induktiven Spannungsverlust als Transformatoren für geringere Spannungen.

Kurze gedrungene Schenkel ergeben geringere Streuung, erfordern aber schwerere Joche, als lange dünne Schenkel.

(331) Das allgemeine Transformatordiagramm für Transformatoren mit nebeneinander liegenden Spulen und Luftspalt (vgl. Abb. 138 und 139). Die Magnetisierung der rechten Ringhälfte erfordert die MMK H_2. Die Potentialdifferenz zwischen A und B ist daher, vgl. (310) Satz 2, $\Pi_{AB} = H_2 \widehat{-} 0{,}4\Delta_2$. Sie erzeugt den sekundären Streufluß Φ_{s2} Man kann Φ_{s2} proportional und phasengleich mit Π_{AB} annehmen. Im Luftspalt befindet sich daher der Induktionsfluß $\Phi^L = \Phi_2 \widehat{+} \Phi_{s2}$. Die Durchmagnetisierung der Luft erfordert die MMK H_L, die zu Π_{AB} addiert nach (310) Satz 3 die Potentialdifferenz Π_{CD} zwischen C und D ergibt. Π_{CD} erzeugt den primären Streufluß Φ_{s1}, der proportional und phasengleich mit Π_{CD} angenommen werden kann und zu Φ_L addiert den primären Induktionsfluß Φ_1 ergibt. Zur Magnetisierung der linken Ringhälfte ist noch die MMK H_1 erforderlich, die nach (310) Satz 1 zu Φ_{CD} addiert die Größe $0{,}4\pi\Delta_1$ ergibt. Dadurch ist Phase und Größe von I_1 festgelegt. Die weitere Konstruktion ergibt sich genau wie in (330). Bei der in Abb. 138 gezeichneten Anordnung ist die Streuung erheblich, sie wird um so mehr verringert, je öfter man unter Wegfall der Luft-

spalte primäre und sekundäre Spulen miteinander abwechseln läßt. Es fällt dann H_L weg, im übrigen bleibt das Diagramm im wesentlichen dasselbe. Daher ist auch Diagramm Abb. 137 auf diesen Fall anwendbar.

(332) Einfluß der Phasenverschiebung auf den Spannungsabfall. Abb. 137 zeigt, daß der induktive Spannungsverlust einen großen Spannungsabfall bei stark induktiver Belastung (z. B. durch Induktionsmotoren), einen geringeren Spannungsabfall bei induktionsfreier Belastung verursacht. Bei voreilendem Strom kann durch den induktiven Spannungsabfall die Spannung sogar erhöht werden. Für die Spannung, die Stromstärke und den Leistungsfaktor des Primärkreises findet man aus Abb. 137 die Formeln:

$$P_1' = \sqrt{(P_2 \cos \varphi_2 + E_w')^2 + (P_2 \sin \varphi_2 + E_s')^2}, \quad \cos \varphi_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2 + E_w'}{P_1'}.$$

(333) Einfluß der Frequenz f auf die Leistung. Wenn bei gegebener Windungszahl m die Leistung konstant bleiben soll, so muß auch das Produkt $f\mathfrak{B}$ konstant bleiben. $\mathfrak{B}$ kann über eine bestimmte Grenze nicht gesteigert werden. Die Leistung muß daher mit sinkender Frequenz abnehmen. Die Wirbelstromverluste bleiben, so lange $f\mathfrak{B}$ konstant ist, auch konstant. Die Hystereseverluste wachsen mit abnehmender Frequenz, daher auch die Gesamtverluste.

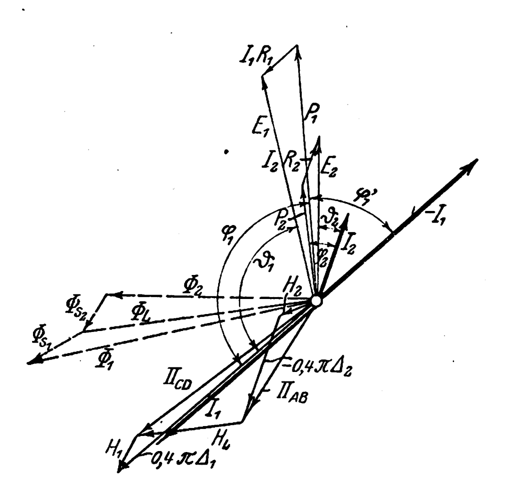


Abb. 139. Vektordiagramm des allgemeinen Transformators.

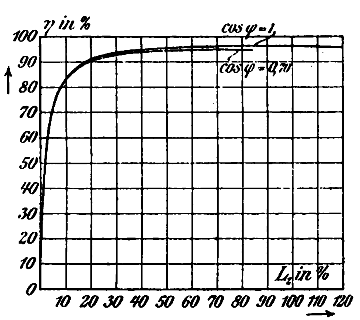


Abb. 140. Wirkungsgrad des Transformators.

(334) Die **Überlastungsfähigkeit** der Transformatoren ist sehr groß, besonders der Öltransformatoren, sofern der bei starker Überlastung auftretende Spannungsabfall keine Betriebsstörung verursacht. Für kurzzeitige Betriebe findet man Überlastungen bis zu 300%, für intermittierende solche bis zu 200% zugelassen. Die Überlastungsfähigkeit von Öltransformatoren ist wesentlich eine Funktion der Wärmekapazität der Ölfüllung.

(335) Der Wirkungsgrad eines Transformators ändert sich mit der Belastung (vgl. Abb. 140). Bei konstanter Spannung sind die Verluste im Eisen von der Belastung unabhängig, prozentual sind sie also umgekehrt proportional der jeweiligen Belastung. Dagegen nehmen die Verluste durch Stromwärme proportional dem Quadrat der Belastung, also prozentual proportional mit der Belastung ab. Die Stromwärme verteilt man zu etwa gleichen Teilen auf die beiden Wicklungen, geht aber bei Lichttransformatoren mittlerer Größe (von etwa 5 kW an) nicht gern über 2%, bei kleinen nicht über 3% der vollen Leistung. Geringe Verluste

im Eisen gewährleisten einen hohen Wirkungsgrad bei schwacher Belastung, haben aber wegen der geringen Magnetisierung höhere Spannungsverluste zur Folge; bei dauernder starker Belastung ist die Magnetisierung stark zu wählen, weil höhere Verluste im Eisen zulässig sind. Der Wirkungsgrad beträgt bei kleinen Transformatoren von 1 kW etwa 92%, er erreicht bei mittleren 96 bis 97% und steigt bei den größten Ausführungen von etwa 10000 kW an auf etwa 99%. Ist der Leistungsfaktor kleiner als eins, so sind die Verluste prozentual höher, der Wirkungsgrad ist also nicht so hoch.

Jahreswirkungsgrad heißt das Verhältnis der in einem Jahre abgegebnen sekundären Arbeit zu der im gleichen Zeitraum verbrauchten primären Arbeit. Bei der Abmessung des Jahreswirkungsgrades ist nicht zu übersehen, daß der Verbrauch an Leerlaufarbeit über Tag nicht zu den gleichen Kosten angesetzt werden darf, wie z. B. der Verbrauch an elektrischer Arbeit zur Zeit der maximalen Stromabgabe mit Beleuchtungsmaximum. Eine unbedeutende Verringerung der Eisenverluste auf Kosten einer wesentlichen Verteuerung des ganzen Transformators ist zu verwerfen.

(336) Entwurf der Transformatoren. So einfach das Prinzip des Transformators ist, so vielseitig sind die Gesichtspunkte, nach denen er zu entwerfen ist. Bei induktionsfreier Belastung, z. B. durch Glühlampen, kann man große Streuung zulassen, ohne dadurch große Spannungsschwankungen befürchten zu müssen. Die Streuung ist gering bei kurzen dicken Schenkeln, bei starkem Induktionsfluß, bei eng übereinander geschobenen oder innig gemischten Primär- und Sekundärwicklungen. Die magnetische Induktion mittelgroßer Transformatoren beträgt bei 50 Per/s 10000 bis 12000 Gauß, man geht sogar bis zu 14000 Gauß. Dabei nimmt man legierte Bleche von 0,3 mm Stärke. Vielfach gilt als Regel, die Verluste in den Wicklungen gleich den Verlusten im Eisen zu machen und die Verluste in den Wicklungen gleichmäßig auf beide Wicklungen zu verteilen, doch stoßen andere Gesichtspunkte diese Regeln vielfach um, z. B. die Forderung eines guten Jahreswirkungsgrades, die bei langen Leerlaufzeiten schwache Magnetisierung verlangt und dadurch zu hohen Kupferverlusten führt. Kurze dicke Schenkel erfordern schwere Joche, verursachen also größere Eisenverluste als lange dünne Schenkel. Bei Kurzschlüssen treten starke Kräfte auf, die die Spulen aus ihrer Lage zu bringen suchen. Diese müssen daher gegen Lagenänderungen gesichert werden. (Vgl. Vidmar, Moderne Transformatorenfragen. Braunschweig 1915, Vieweg u. Sohn. D. wirtschaftliche Aufbau d. elektr. Masch. Berlin 1918, Springer.)

(337) Transformatoren mit einspuliger Wicklung oder in Sparschaltung. (Autotransformatoren, Reduktoren) werden hauptsächlich zum Anschluß von Bogenlampen an Niederspannungsnetze sowie zum Anlassen und Regulieren von Wechselstrommotoren benutzt. Bei gewöhnlichen Transformatoren sind Primär- und Sekundärwicklung sorgfältig voneinander isoliert. Braucht diese Bedingung aber nicht erfüllt zu werden — z. B. wenn beiderseits Niederspannung herrscht —, so gestattet die Sparschaltung, besonders bei nicht zu großem Übersetzungsverhältnis, die Transformatoren kleiner zu bauen. Es wird (Abb. 141) nur eine fortlaufende Wicklung zwischen den Klemmen A und B vorgesehen, die Primärspannung wird an diese Klemmen gelegt, der Sekundärkreis dagegen von einem mittleren Punkte C und dem Punkte B abgezweigt. Es verhält sich dann bei Leerlauf genau und bei Belastung angenähert P_1 zu P_2 wie die Windungszahl zwischen AB zur Windungszahl zwischen CB. Die Stromstärken verhalten sich nahezu umgekehrt wie die Windungszahlen, weswegen der Teil CB stärkeren Querschnitt erhalten muß. Die Stromstärke im äußeren Sekundärkreis ist angenähert gleich der Summe der Stromstärken in AC und BC. Die Sparschaltung kann auch bei Dreh-

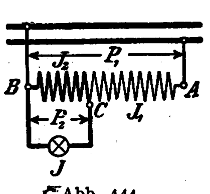


Abb. 141. Einspuliger Transformator, Sparschaltung.

stromtransformatoren angewandt werden, wenn die drei Wicklungszweige in Stern geschaltet sind. Wenn man die vorhandene Spannung P an einen Teil der Wicklung, etwa an A und C, anlegt, so kann man die Sparschaltung auch benutzen, um zwischen A und B eine höhere Spannung abzunehmen.

Ausgleichtransformatoren und Spannungsteiler. Man kann in Abb. 141 auch an AC einen Sekundärkreis anschließen. Der Transformator wirkt dann als Spannungsteiler (Divisor, Kompensator). Den Punkt C kann man z. B., wenn er in der Mitte von AB liegt, mit dem Mittelleiter eines Dreileitersystems verbinden, um den Ausgleich zu sichern. Ist der Unterschied der Stromstärken in beiden Hälften höchstens gleich i, so muß der Ausgleicher für die Stromstärke $^1/_2 \cdot i$ gebaut sein. Die Wicklungsabteilungen müssen gleichmäßig auf beide Schenkel verteilt sein, wenn nicht starke Streuung auftreten soll. Dasselbe gilt für Dreileitertransformatoren, deren Schaltung Abb. 142 angibt.

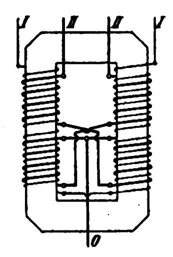
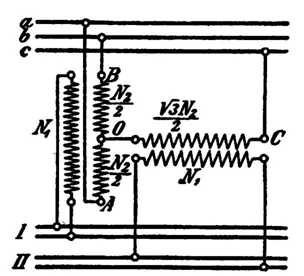


Abb. 142. Transformator mit Dreileiterschaltung.

(338) Zusatztransformatoren. Man kann eine beliebige vorhandene Spannung durch Zusatztransformatoren erhöhen. In Verbindung mit einem Haupttransformator wird die Primärwicklung des Zusatztransformators von der Hoch- oder von der Niederspannung gespeist, die Sekundärwicklung mit der Sekundärwicklung des Haupttransformators in Reihe geschaltet. Häufig wird gerade zu diesem Zweck die Sparschaltung angewendet. Über den drehbaren Zusatztransformator bei Drehstrom vgl. (326).

(339) Transformatoren zum Übergang von Zweiphasenstrom auf Dreiphasenstrom (Scotts Schaltung). Zum Übergang von Zweiphasen- auf Dreiphasenstrom dienen zwei Transformatoren in der Schaltung nach Abb. 143 und mit den in die Abbildung eingeschriebenen Windungsverhältnissen. Die Erklärung der Wirkungs-



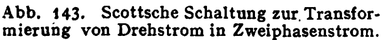


Abb. 143. Scottsche Schaltung zur Transformierung von Drehstrom in Zweiphasenstrom.

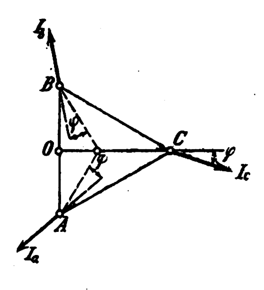


Abb. 144. Vektordiagramm der Scottschen Schaltung.

weise ergibt sich aus dem Diagramm (Abb. 144). AB, BC und CA sind die drei Drehstromspannungen des Sekundärkreises; die Potentiale der Punkte A, B, C und O in Abb. 143 werden durch die gleichnamigen Punkte in Abb. 144 dargestellt. Weitere Schaltungen siehe Rasch ETZ 1911, S. 681.

(340) Schaltung der Zweige bei Drehstrom. Die drei Zweige jeder der beiden Wicklungen können in Stern oder in Dreieck geschaltet werden. Die Sternschaltung ergibt das $\sqrt{3}$-fache der Spannung der Dreieckschaltung. Um bei ungleicher Belastung der drei Zweige bei Sternschaltung einen besseren Spannungsausgleich zu erhalten, werden auch wohl die Sekundärwicklungen I, II, III der

drei Schenkel in je zwei Teile a und b zerlegt und Ia mit IIb, IIa mit IIIb, IIIa mit Ib in Reihe geschaltet, und zwar so, daß ihre EMKe 60° und nicht 120° Phasenverschiebung gegeneinander besitzen, — Zickzackschaltung. Es tritt daher bei Zerlegung in je zwei gleiche Teile in der resultierenden sekundären EMK ein Verlust im Verhältnis $\sqrt{3}:2$ ein.

(341) Parallel- und Reihenschaltung der Transformatoren. Die Primärwicklungen lassen sich immer parallel schalten, wenn sie für gleiche Spannungen bestimmt sind. Bleibt die Primärspannung konstant, so bleibt angenähert auch die Sekundärspannung konstant; die Stromverbraucher in jedem Kreise sind daher parallel zu schalten. Sollen die Sekundärwicklungen auch parallel geschaltet werden, so ist bei einphasigem Wechselstrom nur auf die Verbindung der richtigen Klemmen miteinander zu achten. Drehstromtransformatoren müssen dagegen bestimmten Schaltungsregeln genügen, damit sie sich zugleich primär und sekundär parallel schalten lassen. Das Dreieck der Sekundärspannungen hat nämlich eine ganz bestimmte Lage zu dem Dreieck der Primärspannungen. Die Lage des primären Spannungsdreiecks ist infolge der Parallelschaltung für alle Transformatoren dieselbe, die Lage des sekundären Spannungsdreiecks muß nun auch für alle Transformatoren dieselbe Lage haben. Dies ist z. B. der Fall, wenn alle Transformatoren dieselbe Schaltung besitzen, aber z. B. nicht, wenn ein Teil primär und sekundär in Stern, der andere etwa primär in Stern, sekundär in Dreieck geschaltet ist. Vgl. Faye-Hansen, ETZ 1908, S. 1081. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Schaltungen findet sich in den Maschinennormalien, § 2.

Die Anschlüsse sind immer in gleichartiger Weise aus dem Transformator herauszuführen und genau zu bezeichnen, damit bei der Parallelschaltung mehrerer Transformatoren auf der Primär- und Sekundärseite Kurzschlüsse vermieden werden.

Die Primärwicklungen lassen sich auch in Reihe schalten, wenn sie für dieselbe Stromstärke bestimmt sind. Bei konstanter Stromstärke im Primärkreise bleibt angenähert auch die Stromstärke im Sekundärkreise konstant; die Stromverbraucher in jedem Kreise sind daher in Reihe zu schalten. Durch Kurzschließen der Sekundärwicklung wird der Transformator außer Betrieb gesetzt. Diese Schaltung dient z. B. zum Anschluß von Bogenlampen an Hochspannungskreise bei sehr einfacher Leitungsführung und gefahrloser Bedienung der Lampen. Zu beachten ist, daß die Isolation der Primärwicklung stark genug sein muß, um der vollen Netzspannung zu widerstehen. Wird ein Sekundärkreis unterbrochen, so fällt seine entmagnetisierende Wirkung weg, während die primäre Stromstärke konstant bleibt. Die hierdurch verursachte Steigerung des Magnetismus kann eine übermäßige Erwärmung des Eisens zur Folge haben und muß möglichst vermieden werden. Man hilft sich entweder durch Anordnung eines Luftraumes wie bei Drosselspulen oder durch selbsttätige Kurzschließer im Sekundärkreise, die beim Verlöschen der Lampe in Wirksamkeit treten.

(342) Meßwandler. Zum Messen hoher Wechselspannungen werden durchweg „Spannungswandler“, zur Messung stärkerer Wechselströme „Stromwandler“ angewendet. Diese Transformatoren dienen auch zur Speisung der Wicklungen von anderen Meßgeräten, wie Leistungsmessern, Zählern, Frequenzmessern, und werden daher so eingerichtet, daß an einen Spannungswandler mehrere Geräte in Parallelschaltung, an einen Stromwandler mehrere Geräte in Reihenschaltung angeschlossen werden können. Ferner werden die Wicklungen von Stromschützen und Auslösespulen an solche Transformatoren angeschlossen. Sie bieten die Vorteile, daß alle Wicklungen für niedrige Spannungen und mäßig starke Ströme hergestellt und, wenn der Sekundärkreis geerdet ist, ohne Gefahr berührt werden können, sowie den Vorteil bequemer Leitungsverlegung. Stromwandler müssen möglichst geringen Leerlaufstrom haben, damit die Stromstärken bei jeder Größe einander möglichst genau proportional sind. Dies wird durch Verwendung besten Eisens, vorzüglichen Eisenschluß und geringe Sättigung des Eisens ($\mathfrak{B}$ =

einigen 100 Gauß) erreicht. Ihre Sekundärwicklung darf nicht geöffnet, sondern höchstens kurz geschlossen werden. Spannungswandler arbeiten dagegen mit hoher magnetischer Induktion ($\mathfrak{B} \approx$ 10 000 Gauß), damit der „Fehlwinkel", d.h. die Phasenverschiebung zwischen I_2 und $-I_1$ möglichst klein wird. Die Sekundärwicklung des Spannungswandlers darf nie kurz geschlossen werden. (Vgl. Möllinger u. Gewecke, Zum Diagramm des Spannungs- und des Stromwandlers. ETZ 1911, S. 922, 1912, S. 270. Gewecke, Einfaches Diagramm des Drehstromspannungswandlers, ETZ 1915, S. 253. Möllinger, Wirkungsweise d. Motorzähler und Meßwandler. Berlin 1917, Springer.)

(343) Frequenztransformatoren (vgl. Dießelhorst, ETZ 1914, S. 562, Epstein, Joly, Vallauri) dienen zur Erhöhung der Frequenz der von Hochfrequenzmaschinen erzeugten Ströme für drahtlose Telegraphie. Sie beruhen darauf, daß man durch starke Gleichstrommagnetisierung bis nahe zur Sättigungsgrenze den Verlauf des Induktionsflusses gegenüber dem sinusförmigen Verlauf stark verzerrt und eine der dadurch in der sekundären Stromkurve auftretenden Oberschwingungen durch einen Resonanzschwingungskreis möglichst verstärkt. Wird z. B. der Eisenkern durch einen Gleichstrom hoch magnetisiert, so enthält die Kurve des Induktionsflusses eine besonders starke Oberschwingung doppelter Frequenz. Durch Verwendung zweier gleichsinnig mit Gleichstrom magnetisierter Transformatoren mit gegensinnig in Reihe geschalteten Primär- und gleichsinnig in Reihe geschalteten Sekundärwicklungen kann man die Grundschwingung zum Verschwinden bringen und die Amplitude der ersten Oberschwingung verdoppeln. Durch wiederholte Frequenztransformation kann man die vierfache, achtfache usw. Frequenz herstellen. Die Anordnung gestattet nur eine Transformation von niedrigerer auf höhere Frequenz. Die Eisenkerne der Transformatoren werden aus dünnen, etwa 0,07 mm starken hochlegierten Eisenblechen in Ringform hergestellt. Bei der hohen Frequenz fallen Eisen- und Kupfergewicht sowie die Windungszahlen gering aus. Man kann an Kupfer sparen, wenn man zwei ringförmige Eisenkerne übereinander anordnet, jeden mit einer Primärwicklung versieht und die Sekundärwicklung um beide Eisenkerne gemeinsam legt. Die Transformatoren werden durch Öl gekühlt.

Dritter Abschnitt.

Dynamomaschinen.

Dynamomaschinen im allgemeinen.

(344) Arten der Maschinen: Maschinenteile. Die Maschinen zur Umwandlung mechanischer in elektrische Leistung heißen Dynamomaschinen, die Maschinen zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Leistung heißen Elektromotoren oder Motoren. Der Übergang zwischen Generator- und Motorwirkung ist bei sämtlichen Maschinen möglich und wird in vielen Fällen ausgenutzt; es werden daher in diesem Abschnitt auch die Motoren behandelt.

Hauptbestandteile der Dynamomaschinen sind die Feldmagnete und der Anker, von denen ein Teil umlaufen muß, damit mechanische Leistung verrichtet werden kann. Weitere wesentliche Bestandteile sind Kommutator (Kollektor) oder Schleifringe, Bürsten, Bürstenhalter, Bürstenträger, Klemmen-, Umschalte- oder Kurzschlußvorrichtungen, Gehäuse, Welle, Lager und Grundplatte.

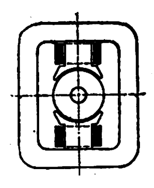


Abb. 145. Symmetrischer Außenpoltyp, zweipolig.

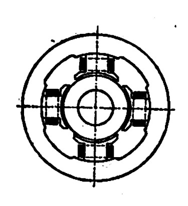


Abb. 146. Vierpoliger Außenpoltyp.

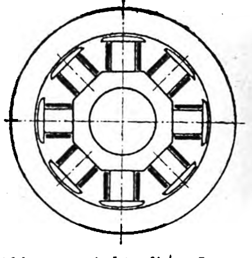


Abb. 147. Achtpoliger Innenpoltyp.

Nach der Form, in der die elektrische Leistung bei Stromerzeugern geliefert und bei Motoren verbraucht wird, unterscheidet man Gleichstrom-, Wechselstrom- oder genauer Einphasenstrom-, Zweiphasenstrom- und Drehstrommaschinen.

Nach der Art des Aufbaues unterscheidet man Außenpol-, Abb. 145, 146, Innenpol-, Abb. 147 und Seitenpolmaschinen sowie offene und gekapselte Maschinen, nach der Zahl der Pole zweipolige, vierpolige, sechspolige usw. Maschinen.

(345) Mechanischer Aufbau. Vgl. die Beispiele ausgeführter Maschinen Abb. 298 bis 323. Die Pole sollen mit Rücksicht auf symmetrische Ausbildung des magnetischen Flusses und auf magnetische Zugkräfte zum Anker symmetrisch stehen. Außenpolmaschinen werden in der Regel mit feststehendem Polgehäuse ausgeführt, als Drehstrommaschinen aber häufig mit umlaufenden Feldmagneten, um den Maschinen ein möglichst großes Trägheitsmoment zu geben (vgl. Abb. 302, S. 371).

Das Gehäuse kann entweder zugleich die Füße der Maschinen und die Lager für die Welle (Lagerschilder) tragen oder auf einer besonderen Grundplatte montiert werden.

Kleine Maschinen bis zu etwa 75 kW bei 600 U/min erhalten in der Regel „Lagerschilder“, die mit dem Polgehäuse verschraubt werden (Abb. 305). Um solche Maschinen nach Bedarf an Wand oder Decke eines Raumes befestigen zu können, ohne daß dabei die Schmiervorrichtung in ihrer Brauchbarkeit beeinträchtigt wird, werden die Lagerschilder so konstruiert, daß sie in verschiedenen Stellungen am Polgehäuse befestigt werden können. Größere Maschinen erhalten besondere Grundplatten mit 2 oder 3 Lagern, letzteres zur besseren Lagerung der Antriebsscheibe bei Riemen- oder Seilantrieb bei größeren Leistungen von etwa 200 kW an; vgl. z. B. Abb. 316, 320, 321, 322.

Man unterscheidet, vgl. Maschinennormalien, I. dem Abschluß nach 1. offene, 2. geschützte Maschinen, bei denen der Luftzutritt nur unwesentlich behindert ist, 3. halb geschlossene, 4. geschlossene Maschinen mit Rohranschluß für die Kühlluft und 5. gekapselte Maschinen, die völlig nach außen abgeschlossen sind; II. der Kühlung nach 1. selbstgelüftete, 2. eigengelüftete mit eingebautem Ventilator, 3. fremdgelüftete mit unabhängigem Ventilator und 4. wassergekühlte Maschinen; III. der Isolation nach 1. Maschinen mit normaler Isolierung, 2. solche mit Feuchtigkeitsisolierung und 3. solche mit Spezialisolierung.

(346) Polgehäuse. Große Polgehäuse werden in der Regel so ausgeführt, daß der untere Teil in die Fundamentgrube hineinhängt (Abb. 300); für besondere Zugänglichkeit ist Sorge zu tragen. Man setzt solche Maschinen gern mit jedem Fuß auf Druckschrauben, durch deren Einstellung der Luftraum der Maschine nach beendeter Montage genau justiert werden kann, und sorgt durch Sicherungsstifte und Zugschrauben für Befestigung des Gehäuses nach der Einstellung. Um sehr große Gehäuse rund zu erhalten, stellt man das Gehäuse sehr steif her oder sorgt in anderer Weise dafür, daß es sich nicht durchbiegen kann. (vgl. Abb. 300 u. 301). Erfahrungsgemäß treten Formveränderungen leichter bei dem unteren als bei dem oberen Gehäuseteil auf. Für den unteren Teil genügt es in vielen Fällen, der Durchbiegung durch Anbringung einer Druckschraube oder zweier Keile unterhalb der Maschine in der Richtung der vertikalen Symmetrieachse zu begegnen (Abb. 300 u. 30).

Die Gehäuse werden bei kleinen Maschinen mit Lagerschildern in der Regel einteilig, bei Maschinen bis zu 6 m Durchmesser zweiteilig, darüber hinaus auch vier- und sechsteilig gebaut. Maßgebend sind Transportrücksichten (Normalprofil der Eisenbahn, bei Bergwerken Schachttransport, in manchen Gegenden Beschränkung des Gewichts der einzelnen zu transportierenden Teile mit Rücksicht auf Träger oder Lasttiere).

(347) Schenkel und Polschuhe. Die Schenkel oder Polschäfte werden in der Regel einzeln hergestellt und mit dem Joch verschraubt. Bei Außenpolmaschinen bildet das Joch zugleich das Gehäuse, bei Innenpolmaschinen die Felge des Magnetrades.

Die Schenkel werden aus Blechen oder aus Stahlguß oder durch Schmieden im Gesenke oder durch Abschneiden von runden Walzeisenstücken, bei starker Beanspruchung durch Zentrifugalkraft auch aus Stahlplatten hergestellt. Man denke sich im letzten Falle das Feldmagnetsystem durch Schnitte senkrecht zur Rotationsachse in Platten zerlegt; diese Platten werden aus dem Vollen geschnitten. Gußeisen bedingt zu große Querschnitte, daher zu großen Umfang und deshalb übermäßigen Aufwand an Erregerkupfer. Der Polschuh wird aus Stahlguß, bei offenen Nuten aber meist aus Blechen hergestellt, weil sonst durch die Bewegung des ungleichförmigen Induktionsflusses, der unter den Zähnen größer ist als unter den Nuten, Wirbelströme entstehen.

Abb. 148 bis 151 zeigen einige Polbefestigungen; die Flächen zwischen dem Fuß des Schenkels und dem Joch werden durch Drehen bearbeitet und haben daher zylindrische Auflageflächen. Ebene Auflageflächen würden Abhobeln oder Fräsen und namentlich bei größerer Polzahl großen Aufwand an Arbeitslohn bedingen. Bei Innenpolmaschinen ist die Befestigung mit Rücksicht auf die oft sehr bedeutenden Fliehkräfte zu berechnen und entsprechend zu sichern.

Werden ruhende Blechaußenpole durch Verschrauben mit dem Gehäuse verbunden, so kann das Gewinde direkt in den mit starken Endblechen versehenen Blechkörper geschnitten werden, wenn dieser hydraulisch zusammengepreßt und mit Bolzen zusammengenietet ist, Abb. 151. Auf genaue Stellung der Polköpfe ist überhaupt zu achten. Stahlgußpole sind an den Kanten der Polschuhe nötigenfalls zu bearbeiten, angeschraubte Pole sind durch Sicherungsstifte, Stellringe oder Bearbeitung der Bolzen genau mit dem Gehäuse zu verbinden. Stellringe, Abb. 149 und 151, bieten zugleich den Vorteil der sicheren Entlastung der Schraubenbolzen gegen tangentiale Kräfte. Werden sie angewandt, so ist aber darauf zu achten, daß sie den Anzug der Schrauben nicht stören.

Werden magnetisch gut leitende Polschäfte an ein gußeisernes Joch geschraubt, so tritt an der Verbindungsstelle ein beträchtlicher magnetischer Widerstand auf Dieser ist möglichst dadurch zu vermindern, daß die Fläche des Gußeisens, gegen die der Polschaft geschraubt wird, bedeutend größer als der Querschnitt des letzteren gemacht wird, Abb. 151.

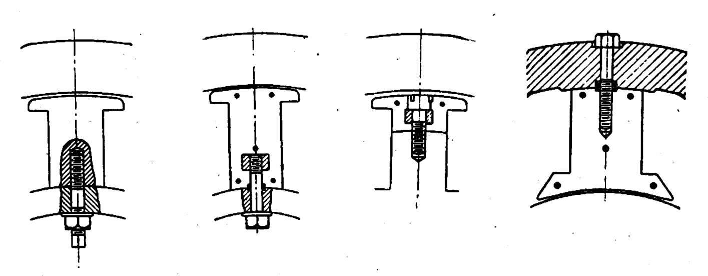


Abb. 148 bis 151. Polbefestigungen.

Bei Antrieb durch Wasserturbinen und nach amerikanischer Bauart bei Dampfturbinen wird die Welle der Dynamos häufig vertikal gestellt, vgl. Abb. 304.

Bei den Turbodynamos[1]) besteht der Feldmagnet häufig aus einem genuteten, aus vollem Stahl hergestellten Zylinder, der mit der Welle aus einem Stück geschmiedet ist, entsprechend Abb. 152, oder aus genuteten auf die Welle aufgeschrumpften Stahlplatten. Die AEG stellt die Zähne aus Stahllamellen her, die schwalbenschwanzförmig in die verstärkte Welle eingesetzt sind (Z. d. V. D. I. 1909, S. 699 ff.), Abb. 153. Die Nuten werden sorgfältig durch leitende Keile geschlossen, die, an beiden Stirnseiten leitend miteinander verbunden, eine Dämpferkurzschlußwicklung darstellen (450). Die zu beiden Seiten aus den Nuten herausragenden Wicklungsköpfe werden durch übergeschobene Bronzekappen gegen die Fliehkräfte gesichert.

Auch werden Polsterne mit Polschäften von kreisrundem Querschnitt, die auf die Welle aufgeschrumpft sind, mit aufgeschraubten Polschuhen verwendet. Die Pole erhalten dazu ein sauber geschnittenes Gewinde, das in das Muttergewinde

1) Pohl, ETZ 1908, S. 113. — Kolben, ETZ 1909, S. 121. — Rosenberg, ETZ 1909, S. 582 — Ziehl, ETZ 1909, S. 647. — Lasche, Zeitschr. d. V. D. I. 1909, S. 699. — Brown, Boveri & Cie. ETZ. 1918, S. 416.

der Polschäfte geschraubt wird, Abb. 154. Solcher Polsterne werden auch zwei nebeneinander gesetzt (vgl, Turbodynamo für 5000 kW von Brown, Boveri & Cie. ETZ 1918, S. 416).

(348) Erregung der Feldmagnete. Die Pole erhalten eine Erregerwicklung nach Art der in (301) behandelten. Am besten ist es, alle Polschäfte mit gleichen Erregerspulen zu versehen. Da hierbei Nord- und Südpole miteinander abwechseln, so nennt man diese Bauart den Wechselpoltyp, Abb. 145 bis 147.

(349) Die **Wicklung der Schenkel** wird ebenso ausgeführt wie bei den gewöhnlichen Elektromagneten (vgl. 301); aber mit Rücksicht auf die Stellung der Pole sind in vielen Fällen besondere Vorrichtungen zum Festhalten der Spulen, wie angenietete Winkel, mit Nasen versehene Stücke aus schmiedbarem Guß und dergleichen erforderlich. Sofern die Pole umlaufen, ist mit Rücksicht auf die Fliehkräfte eine festere Verbindung notwendig. Hierzu werden entweder die Polschuhe benutzt oder, wenn bei sehr großen Geschwindigkeiten die Kräfte sehr

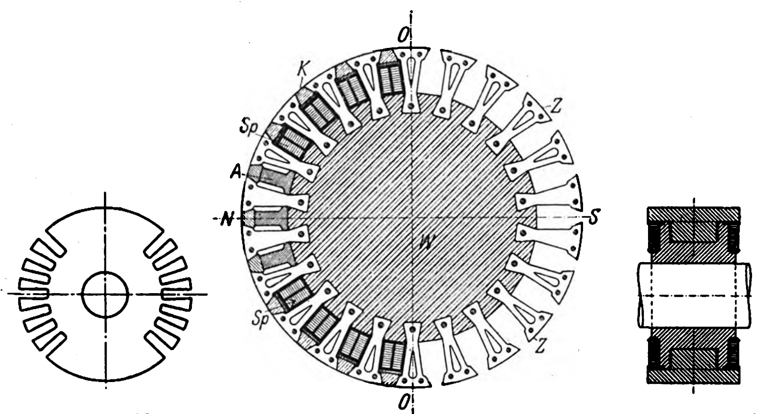


Abb. 152. Feldmagnet für Turbodynamos mit eingeschnittenen Nuten.

Abb. 153. Feldmagnet für Turbodynamos mit eingesetzten Blechzähnen.

Abb. 154. Feldmagnet mit aufgeschraubten Polen.

bedeutend werden, Spezialanordnungen angewendet. Bei umlaufenden Polen ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß ein Umbiegen der Drähte unter der Wirkung der Fliehkräfte verhindert wird, doch vermeide man tunlichst Konstruktionsteile, die die Lüftung behindern. Es empfiehlt sich nicht, die Feldspule von Hand in die fertige Maschine anstatt auf den einzelnen Pol zu wickeln; eine solche Wicklung fällt meist unsauber aus und ist sehr kostspielig, sie sollte daher nur in Ausnahmefällen zugelassen werden.

(350) Rücksicht auf Kühlung. Es ist wichtig, dafür zu sorgen, daß die Oberfläche der Erregerspulen von dem durch die Maschine in Bewegung gesetzten Luftstrom bestrichen werde, damit eine möglichst wirksame Kühlung erzielt wird. Aus diesem Grunde ist namentlich ein zu enges Zusammendrängen der Feldmagnetspulen zu vermeiden. Die Polbewicklungen werden auch wohl aus mehreren konzentrischen, durch Verschnürung zusammengehaltenen Spulen mit passenden Holzzwischenlagen zusammengesetzt. Die vom Anker weggeschleuderte Luft kann dann bequem durch die parallel zur Spulenachse liegenden Kanäle streichen und die Wicklung wirksam kühlen, so daß sich bei geringer Erwärmung eine Ersparnis an Erregerkupfer ergibt.

(351) Massenausgleich. Dynamomaschinen verlangen einen guten Massenausgleich, und zwar natürlich um so mehr, je schneller sie laufen. Der umlaufende Teil soll vor und nach der Bewicklung mit einer Welle versehen auf Schneiden gelegt oder beweglich gelagert und daraufhin geprüft werden, ob er in seiner Lage verharrt, bzw. ob er ruhig läuft oder sich nach „dem Schwerpunkt einstellt". In letzterem Falle ist durch Hinzufügen oder Fortnehmen von Gewichten für Ausgleich zu sorgen. Bei größerer axialer Ausdehnung muß die Schwerlinie mit der Wellenachse zusammenfallen. Die Ausgleichgewichte sind daher an beiden Seiten des Ankers anzubringen. Schnellaufende Läufer, z. B. für Turbodynamos, läßt man in elastisch aufgehängten Lagern laufen, deren Schwingungen selbsttätig aufgezeichnet werden. Die Ausgleichgewichte sind so anzubringen, daß die Schwingungen verschwinden.

(352) Schwungraddynamos. Dynamos, die zur direkten Kupplung mit Dampfmaschinen oder Gasmotoren bestimmt sind, werden unter Umständen so ausgebildet, daß sie zugleich als Schwungrad dienen (Abb. 301, 302). Als Vorteil kommt hierbei in erster Linie die Raumersparnis in Frage, doch ist dieser Vorteil meist nur zu erkaufen durch Erhöhung des Dynamomaschinenpreises, der bei Gleichstrommaschinen fast immer, bei Drehstrom- und Wechselstrommaschinen sehr oft wesentlich höher wird als bei Anordnung besonderer Schwungräder. Bei der Formgebung des Schwungringes sorge man wieder dafür, daß die Lüftung der Maschine nicht beeinträchtigt wird. Über die mechanische Beanspruchung von Schwungrädern siehe Werner, D. mechan. Beanspruchung rasch laufender Magneträder. Diss. Aachen, 1908.

Werden besondere Schwungräder angewandt oder mehrere Dynamos mit einer Dampfmaschine starr gekuppelt, so sollen alle Schwungmassen möglichst unmittelbar nebeneinander auf der Welle angebracht werden, um Torsionsschwingungen zu vermeiden. Vielfach wird das Schwungrad mit dem umlaufenden Teil der Maschine durch starke Bolzen verbunden.

Besonders gefährlich ist die Übereinstimmung (Resonanz) der „Eigenschwingungszahl" Z der Welle mit der Schwingungszahl der von den Antriebskurbeln hervorgerufenen „erzwungenen Schwingungen". Sie führt leicht zu starken Schwingungen und infolge davon zu starken Beanspruchungen der Welle und Flimmern im Licht.

(353) Lager. Die Lager für Dynamomaschinen werden mit sehr reichlichen Abmessungen, Zapfendruck 5 bis 12 kg*/cm² entweder als Gleitlager oder als Kugellager ausgeführt. Der Lagerkörper wird bei normalen Typen aus Gußeisen, und entweder als Lagerschild, vgl. (345), oder als Lagerbock ausgebildet. Für genaue Zentrierung der Lager ist Sorge zu tragen. Zweckmäßig wird so entworfen, daß die Auflageflächen des Lagerkörpers und die Bohrungen des Ankers oder des Polgehäuses auf derselben Werkzeugmaschine hergestellt werden können. Bei gekapselten Maschinen werden die Polgehäuse vielfach gleich für die Aufnahme des Lagers eingerichtet. Mittlere und kleine Maschinen erhalten einteilige Lager. Die Schalen werden aus Bronze oder Gußeisen mit Weißmetall hergestellt. Von besonderer Bedeutung bei Dynamomaschinen ist wegen der Saugwirkung des Läufers, daß die Lager öldicht ausgeführt werden, und zwar sowohl so, daß das Öl nicht verspritzt, als auch so, daß das Schmiermittel nicht aus dem Ölsumpf austreten kann. Man versieht daher die Wellen mit sogenannten Spritzringen oder schließt die Lager nach der Läuferseite hin gut ab.

(354) Schmierung. Gleitlager normaler Maschinen von nicht zu großer Leistung werden durchweg, wenn sie nicht starken Erschütterungen ausgesetzt sind oder schiefe Lagen annehmen können, durch Ringe geschmiert. Kleine Lager bis zu 300 mm Länge erhalten einen, größere zwei, drei oder mehr Ringe. Beim Entwurf des Lagers ist darauf zu achten, daß die Schmierringe bequem angebracht und ihr Arbeiten jederzeit beobachtet werden kann. Maschinen von sehr großer Leistung und Drehzahl können mit Ringschmierung nicht mehr in ausreichender Weise

geschmiert werden. Man verwendet dann kleine Ölpumpen, mit denen man das Öl unter Druck unter den Zapfen treten läßt, in ähnlicher Weise wie bei der Ringschmierung sammelt und gebotenen Falles in einer Rückkühlanlage kühlt. Auch Wasserkühlung von Lagern wird ausgeführt.

(355) Kugellager werden namentlich für Motoren und Maschinen kleinerer Leistung verwandt. Sie bieten den Vorteil verringerter Reibungsleistung und bringen die Wartung der Lager auf das erreichbare Mindestmaß. Auch gewähren sie die Möglichkeit, den Lagerkörper in axialer Richtung mit sehr geringen Abmessungen auszuführen. Nachteilig ist, daß sie einen sehr genauen Einbau erfordern (vgl. Abb. 310).

(356) Bauart der Motoren. Die Motoren werden in der Regel ebenso ausgeführt wie die Gleichstromgeneratoren.

Für Betriebe, bei denen der Kommutator und die Wicklungen gegen Staub, Feuchtigkeit und ätzende Dämpfe geschützt werden müssen (Fahrzeugbetrieb, Kranbetrieb usw.), kommt die ganz oder nahezu geschlossene Bauart in Anwendung (Abb. 306, 307, 310, 311, 312, 313, 315).

Geschlossen gekapselte Motoren dürfen, weil die Kühlung viel geringer ist, nicht so stark belastet werden wie offene Motoren. Daher werden nach Möglichkeit ventiliert gekapselte Motoren verwendet, bei denen ein kräftiger Luftdurchzug durch Ventilatorflügel am Anker erzielt werden kann (Abb. 311). Die Lagerschilder werden z. B. durch Jalousien verschlossen die besonders dem Tropfwasser das Eindringen verwehren. Mitunter werden Kühlmäntel für Wasserkühlung angebracht oder ein Luftumlauf mit künstlicher Kühlung vorgesehen. (Abb. 309),

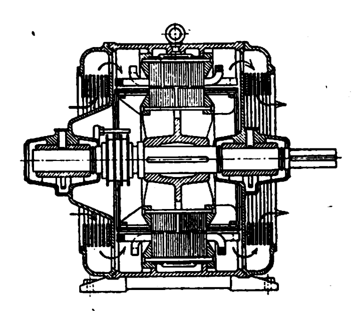


Abb. 155. Motor für Schlagwettergruben mit Plattenschutz.

Besondere Aufmerksamkeit erheischen die Motoren für Schlagwettergruben. Sie werden entweder ganz gekapselt oder mit Plattenschutz versehen (Abb. 155). Die Kapselung muß einem inneren Überdruck von mindestens 8 Atmosphären widerstehen und es ist darauf zu achten, daß im Innern nicht mehrere Räume vorhanden sind, die nur durch enge Öffnungen miteinander in Verbindung stehen. Der Plattenschutz besteht aus einem Paket von ebenen Ringen aus Messing- oder Bronzeblech (auch verzinntem oder verzinktem Eisenblech), die höchstens 0,5 mm voneinander abstehen und deren Lage gegeneinander durch genügend viele Einlagen gesichert ist. Die radiale Ausdehnung der Schlitze zwischen den Blechen soll etwa 50 mm betragen. Der Plattenkörper ist vor Beschädigungen geschützt und leicht auswechselbar anzuordnen. (Glückauf 1906, S. 1 ff., ETZ 1906, S. 200 u. 363.)

Anker.

(357) Die **Anker der Dynamomaschine** werden aus runden Scheiben oder Ringen von Eisenblech von 0,3 bis 0,5 mm Dicke (nach den Verbandsnormalien) aufgebaut. Dies ist nötig, um das Auftreten von Wirbelströmen nach Möglichkeit zu verhüten. Die Ebene der Bleche muß dabei mit der Richtung des magnetischen Induktionsflusses zusammenfallen. Kleinere Scheiben und Ringe werden aus einem Stück, größere Ringe aus Teilen mit Überblattung nach Art der Gall-schen Kette zusammengesetzt. Die Grenze für die eine oder andere Ausführungsform ergibt sich aus den normalen Größen für Dynamobleche. Diese sind $2000 \times 1000 \times 0,5$ und $1600 \times 800 \times 0,3$ mm. Beim Entwurfe achte man auf gute Ausnutzung der Tafeln.

Die Ankerbleche werden durch Druckringe gefaßt und durch Verschrauben mit Bolzen, die gegen Ankerkörper und Bleche zu isolieren sind, oder bei größeren Maschinen durch vorgelegte Schrumpf- oder Sprengringe, Verkeilungen oder Eingüsse festgehalten. Bei der Herstellung bedient man sich zweckmäßig starker Schraubpressen oder hydraulischer Pressen. Eine ältere Anordnung, die Druckringe bei umlaufendem Anker mit Hilfe eines auf die Welle geschnittenen Gewindes zu verschrauben, ist zu vermeiden.

Die Endbleche werden in der Regel, um ein Aufblättern der Blechpakete zu vermeiden, stärker (2—3 mm) hergestellt, oder der Blechkörper wird an den Zähnen treppenartig abgesetzt.

(358) Nuten. Die Anker werden mit Nuten zur Aufnahme der Wicklung ausgeführt. Die Nuten sind entweder ganz offen oder halb oder ganz geschlossen (vgl. Abb. 157 bis 161). Bei halb oder ganz geschlossenen Nuten wird der stehenbleibende Steg am Umfange so schwach gemacht, als es die Herstellung und mechanische Rücksichten gestatten.

Die Nuten werden durch Stanzen hergestellt. Schnitte zum gleichzeitigen Ausstanzen ganzer Bleche oder großer Segmente mit vielen Nuten sind kostspielig; es ist daher das Ausstanzen einzelner Nuten („Hacken"), bei denen das Ankerblech nach einer Teilvorrichtung mit selbsttätigem Vorschub vor dem Nutenschnitt vorbei bewegt wird, oft vorteilhafter. Hierbei läßt sich die Nutung ohne erhebliche Kosten für jede Maschine in den jeweilig am besten erscheinenden Abmessungen herstellen. Die Bleche sind unter Benutzung von Führungsbolzen möglichst genau übereinander zu schichten, um das Nacharbeiten der Nutenwände, wobei ein Verschmieren der Bleche miteinander nicht völlig zu vermeiden ist, auf das geringste Maß zu beschränken.

Mit Rücksicht auf die Stanzarbeit müssen die stehenbleibenden Zähne mindestens noch 2 mm Breite haben. Sollen genutete Anker nach dem Zusammenbau abgedreht werden, so muß bei offenen Nuten für sehr reichliche Zahnbreite gesorgt werden. Halboffene Nuten werden in dem Falle zweckmäßig geschlossen gestanzt und erst nach dem Abdrehen mit der Säge aufgeschnitten. Während des Abdrehens werden die Nuten mit Holz oder sonstwie ausgefüllt.

(359) Befestigung des Ankers auf der Welle. Umlaufende Anker aus vollen Blechen werden in der Regel so mit der Welle verbunden, daß in der Mitte der Bleche ein zur Welle passendes Loch mit Federnut eingestanzt wird, so daß das „aktive" Eisen unmittelbar auf der Welle zusammengebaut werden kann. Dabei ist zu beachten, daß für Luftzutritt zu den Ventilationsschlitzen besondere Öffnungen vorgesehen werden müssen. Bei größerem Durchmesser bildet das Ankereisen einen Ring. Es ist dann eine besondere Nabe mit Armen vorzusehen. Die Eisenbleche werden entweder unmittelbar gegen die in der Richtung der Achse des Ankers langgestreckten Arme gelegt, oder es ist ein besonderer Schwungradkranz vorhanden, gegen den die Bleche gelegt werden.

(360) Lüftung des Ankers. Da sich das Ankereisen beim Betriebe erwärmt, ist es vorteilhaft, es in geeigneten Abständen (50—100 mm) mit Lüftungsschlitzen von etwa 10 mm Breite zu versehen. Zur Aufrechterhaltung des Abstandes dienen Finger nach Abb. 156 oder Bleche mit an 3 Seiten abgestanzten und dann rechtwinklig aufgebogenen Lappen, wobei diesen Zwischenstücken zugleich die Rolle der Flügel eines Kreiselventilators zufällt. Schnell laufende Maschinen von großer Leistung, insbesondere Turbodynamos, bedürfen einer starken Lichtung, für die in der Regel an den Stirnseiten besondere Ventilatorflügel angebracht werden. Die Luft wird dann häufig in axialer Richtung durch unmittelbar unter den Nuten und verteilt im Joch vorgesehene Löcher durch den Ankerkörper getrieben (vgl. Abb. 299, 312, 313,).

Bei gekapselten Maschinen ist die Abkühlung stark vermindert, sie leisten daher bei gleicher Erwärmung nur 40—50% von der Leistung offener Maschinen. Einen mit Wasserkühlung und Lüftung arbeitenden Motor zeigt Abb. 309, bei

dem die Luft durch Wasser gekühlt wird. Die Leistung wird dadurch nahezu eben so hoch wie bei normalen Motoren. Bei Straßenbahnmotoren läßt man eine höhere Temperatur zu; man rechnet daher aber auch mit einer größeren Abnutzung. Vgl. auch (302).

(361) Ankerwicklungen. Man unterscheidet Ring-, Trommel- und Scheibenwicklung. Letztere wird kaum mehr ausgeführt, ihr Wicklungsprinzip ist in der Regel das der Trommelwicklung. Bei der Ringwicklung wird der isolierte Kupferleiter um einen Eisenring herumgewickelt. Auch diese Wicklung ist veraltet. Die üblichste Wicklung ist die Trommelwicklung. Bei ihr liegen die Drähte nur auf der Außen- oder nur auf der Innenfläche eines Eisenzylinders und auf oder an dessen Stirnflächen. Daher kann jede einzelne Windung oder Spule, sofern der Anker mit offenen Nuten versehen ist, vom Ankerkern abgehoben werden. Diese Art Wicklung läßt das für die Fabrikation der Maschinen wichtige Verfahren zu, die Spulen in Schablonen zu wickeln und dann auf den Anker zu bringen.

Die einzelnen Wicklungsteile werden auf besonderen „Formen" oder „Schablonen" aus Holz, Messing oder Eisen vor dem Einlegen in den Anker fertig gebogen und in die Nuten eingelegt. Stabwicklung wird erst nach dem Biegen isoliert, Drahtspulen werden häufig ebenfalls noch einmal mit Isolierband umwickelt. Die Wickelformen werden entweder so eingerichtet, daß jeder Draht oder jeder Stab (abgerundete Kanten!) gegebenenfalls unter Benutzung des Holzhammers in der Form in die gewünschte definitive Gestalt gebogen wird, oder so, daß schmale Spulen von sehr langgestreckter Form auf geteilte Dorne gewickelt und dann, nachdem die verlangte Drahtzahl aufgelaufen ist, auseinander gezogen werden.

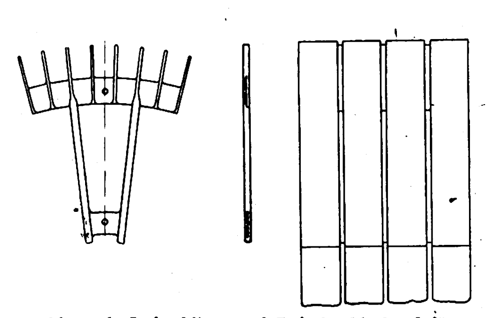


Abb. 156. Luftschlitze und Zwischenbleche dafür.

Bei Ankern von nahezu oder ganz geschlossenen Nuten kann die Wicklung nur durch „Einziehen" oder „Nähen" eingebracht werden. Drahtwicklungen dieser Art werden zweckmäßig so hergestellt, daß man anfänglich die Nut mit Stäben vom Durchmesser des isolierten Drahtes füllt und beim Wickeln Stab für Stab mit den einzuziehenden Windungen herausschiebt.

Liegt die Trommelwicklung auf der äußeren Zylinderfläche, so kann der Ankerkörper ein Vollzylinder — bei kleinen Durchmessern — oder ein Hohlzylinder (Eisenring) — bei größeren Durchmessern — sein. Liegt die Trommelwicklung an der Innenseite des Zylinders (Hohltrommelwicklung), so ist der Eisenkörper immer ein Ring, der sich in einem äußeren gußeisernen oder schmiedeeisernen Gehäuse befindet.

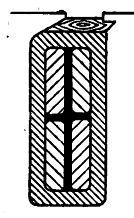
Bei großen Maschinen ist es wichtig, die Wickelköpfe, d. h. die aus dem Eisen herausragenden Teile der Spulen auch auf dem feststehenden Teil in ihrer Lage festzuhalten, weil sie sehr starken elektrodynamischen Kräften ausgesetzt sind, vgl. Abb. 299.

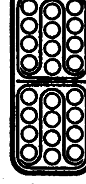
(362) Material der Wicklung. Die Wicklung wird aus Leitungskupfer nach den Normalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker und neuerdings auch vielfach aus Aluminium in Form von Draht, Band, Seil oder Stäben hergestellt. Bei Zink- und Eisenwicklung wird die Ausnützung des Wicklungsraumes so schlecht, daß die Maschinen erheblich schwerer und teurer werden. (Vgl. R. Richter,

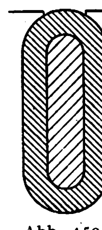
Elektr. Masch. mit Wicklungen aus Aluminium, Zink u. Eisen. Braunschweig 1916, Vieweg u. Sohn.) Hinsichtlich der **Isolation der Ankerwicklung** ist zu unterscheiden zwischen Isolation am Ankerkörper und Isolation der eigentlichen Wicklung. Zur Bekleidung des Ankerkörpers und Auskleidung der Nuten kommt in Frage für Spannungen bis zu etwa 500 V getränkte Leinwand, Mikanitleinwand, Preßspan und andere präparierte Papiersorten, für Hochspannung fast nur Glimmer und Mikanit. Die Zwischenräume zwischen den Leitern werden dabei auch wohl mit Isolierstoff ausgefüllt, damit alle Lufträume beseitigt werden und sich kein Ozon bilden kann. Die so hergestellten Spulen werden dann erwärmt und gepreßt („gebacken"; vgl. Perlewitz, ETZ 1911, S. 1028). Die Stäbe von Stabwicklungen werden durch Bewicklung mit Leinwand, Papier und dergleichen oder durch Einhüllen mit Preßspan oder Mikanit isoliert und mit einem Isolierlack getränkt. Drähte werden durch zwei- oder dreifaches Bespinnen mit Baumwolle oder Beklöppeln isoliert, Seile und Litzen werden beklöppelt. Für Teile, die besonders leicht der Beschädigung ausgesetzt sind, verwendet man Schutzhülsen aus geklöppeltem Garn, sogenannte „Hosen".

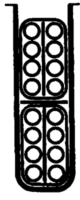
Der durch Isolation der Leiter beanspruchte Raum kann im allgemeinen nach folgenden Angaben angenommen werden:

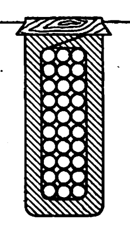
	einseitig mm	i. ganzen mm
Dicke der Bandwicklung mit halber Überlappung	0,35	0,70
„ „ Papierbewicklung „ „ „	0,5—0,25	1—0,50
„ „ Umspinnung von Runddraht von 0,1—1 mm		0,30
„ „ „ „ „ „ 1—4 „		0,50
„ „ „ „ „ „ 4—7 „		0,80
„ „ Umklöppelung	0,35	0,70


Abb. 157.


Abb. 158.


Abb. 159.


Abb. 160.


Abb. 161.

Nutenformen.

Um an Raum für Isolation zu sparen, sucht man bei Nutenankern mit nicht zu hoher Nutenzahl auszukommen (grobe Nuten); häufig müssen dann in einer Nut viele Stäbe oder Spulenseiten (bis zu 8) untergebracht werden. Die Bestandteile solcher Bündel werden einzeln isoliert und vor dem Einlegen vereint noch einmal mit Isolation umgeben. Besondere Umkleidung der Nuten ist dann für niedrige Spannung entbehrlich. Einzelheiten geben Abb. 157 bis 161.

(363) Hohe Spannungen im Anker. Beim Entwurf irgendeiner Ankerwicklung ist mit großer Sorgfalt darauf zu achten, daß hohe Spannungen zwischen nebeneinander liegenden Leitern, z. B. bei der Anordnung nach Abb. 161, vermieden werden. Es genügt dabei nicht, nur mit den im normalen Betriebe auftretenden Spannungen zu rechnen, weil Umstände besonderer Art (Überspannungswellen) hohe Spannungen zwischen benachbarten Windungen der Wicklung hervorrufen können.

(364) Prüfung der Isolation. Die fertigen Spulen und der fertig gewickelte Anker sind auf Isolation zu prüfen. Da alle Isolierstoffe bei steigender Temperatur an Isolierfestigkeit verlieren, muß das Material bei derjenigen Höchsttemperatur

geprüft werden, die im äußersten Fall in der Maschine vorkommen kann, wobei zu bedenken ist, daß die gewöhnlich gemessenen Erwärmungen Mittelwerte darstellen, die wesentlich unter der höchsten Temperatur im Innern der Maschinenteile liegen.

Ankerspulen werden vor dem Einlegen auf Isolation der Windungen gegeneinander geprüft, indem man sie mit offenen Enden über einen Transformatorkern schiebt, der mit Hilfe einer Primärwicklung mit Wechselstrom erregt wird. Hat eine Spule in sich Schluß, so fließen bei der Prüfung in ihr starke Ströme; man erkennt sie daher leicht an der Erwärmung. Nach dem Einlegen der Spulen empfiehlt sich eine erneute Prüfung in der Weise, daß ein mit Wechselstrom erregter Magnet durch einen Teil des Ankers geschlossen wird, so daß in den einzelnen Ankerspulen durch den Wechselmagnetismus nicht zu kleine EMKE induziert werden. Auf einfache Weise erreicht man das, indem man einen hufeisenförmigen offenen Wechselstrommagnet an den Anker legt.

(365) Anordnung der Wicklung[1]. Bei der Trommelwicklung wird der Kupferleiter stets auf der Zylinderfläche parallel zur Achse unter einem Pole hin-, unter dem benachbarten Pole zurückgeführt. Hin- und Rückführung bilden eine Windung, mehrere solche in derselben relativen Lage zu den Polen neben- oder übereinander liegende Windungen eine Spule. Eine solche Spule oder auch die einzelne Windung, wenn keine Spulen vorhanden sind, bildet ein Wicklungselement. Das einfachste ist, den Abstand der Hin- und Rückführung — der beiden Spulenseiten — gleich oder nahezu gleich der Polteilung zu wählen. Man erhält dann lange Spulen oder Durchmesserwicklung (Abb. 162). Man kann den Abstand auch kürzer wählen, jedoch mindestens gleich dem Polschuhbogen, damit nicht beide Seiten unter demselben Pol liegen können — kurze Spulen, Sehnenwicklung (Abb. 163). Letztere ist bei Anordnung von Wendepolen (385) nicht zu verwenden.

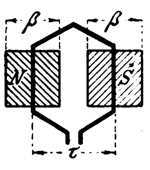


Abb. 162. Lange Wicklungsschleife.

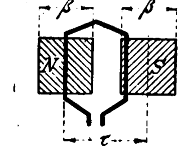


Abb. 163. Kurze Wicklungsschleife.

Man unterscheidet:

1. Käfigwicklungen,
2. Phasenwicklungen,
3. fortlaufende in sich geschlossene oder aufgeschnittene Wicklungen, auch schleichende Wicklungen genannt.

Die Käfigwicklung von Dobrowolsky besteht aus Stäben, die parallel zur Achse an der Oberfläche des Ankers, meist in Nuten, angebracht und sämtlich auf beiden Seiten durch starke Ringe leitend miteinander verbunden sind. Sie wird besonders für den Läufer kleinerer Induktionsmotoren angewendet.

Die Phasenwicklung wird besonders bei Wechselstrommaschinen angewendet. Sie besteht aus Spulen oder Spulengruppen, die entweder sämtlich (bei Einphasenmaschinen) oder gruppenweise (bei Mehrphasenmaschinen) dieselbe relative Lage zu den Polen einnehmen. Die Schaltung der Spulen oder Spulengruppen ist sehr mannigfaltig. Hintereinanderschaltung ist im weitesten Maße möglich, Parallelschaltung nur bei solchen Gruppen, in denen die erzeugten EMKE gleiche Phase haben. Abb. 164a zeigt eine Einphasen- mit kurzen, Abb. 164b eine Zweiphasen-, Abb. 164c eine Dreiphasenwicklung mit langen, übergreifenden Spulen.

---

1) Siehe Arnold und la Cour, D. Gleichstrommaschine. — Pichelmayer, Dynamobau und andere Lehrbücher. — Reithofer, Eichberg, Kalir, Z. f. E., Wien 1898, S. 17.

Fortlaufende in sich geschlossene Wicklungen werden namentlich bei Gleichstrommaschinen, teilweise aber auch, insbesondere bei mäßigen Spannungen, für Drehstrom- und Wechselstrommaschinen benutzt. Sie bestehen aus aneinander geschalteten Wicklungselementen, die sich in verschiedenen relativen Lagen zu den Polen befinden. Die Änderung der Lage aufeinander folgender Wicklungselemente zu den Polen nennt man ihre *Feldverschiebung*. Fortlaufende Wicklungen können als *Ringwicklung* (*Pacinotti*scher oder *Gramme*scher Ring) oder als *Trommelwicklung* (v. *Hefner-Alteneck*) ausgeführt werden. Bei letzterer — der allein üblichen Wicklung — unterscheidet man *Schleifen-* und *Wellenwicklung*. Anfang und Ende jedes Wicklungselementes werden an zwei verschieden liegende Kommutatorteile angeschlossen. An jedem Kommutatorteil endet daher ein Element und beginnt ein neues. *Es sind also ebensoviel Kommutatorteile wie Wicklungselemente vorhanden.* Mitunter wird zwischen die Verbindungsstellen der aufeinander folgenden Elemente und die Kommutatorteile noch je ein Draht oder Blechstreifen von höherem Widerstande geschaltet (*Widerstandsverbinder*). Die Wicklungen können einfach

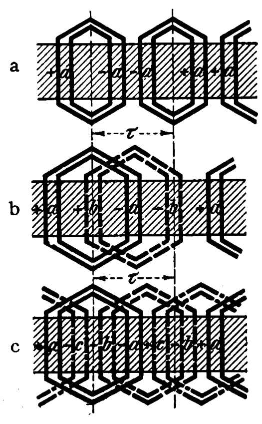


Abb. 164 a—c. Einphasen-, Zweiphasen-, Dreiphasenwicklung.

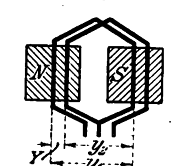


Abb. 165. Schleifenwicklung.

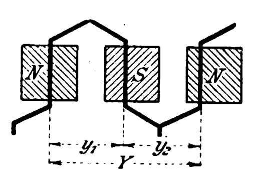


Abb. 166. Wellenwicklung.

oder mehrfach geschlossen sein. Mehrfach geschlossene Wicklungen entstehen, wenn man mehrere einfach geschlossene Wicklungen parallel zueinander auf dem Anker anbringt, z. B. eine zweifach geschlossene Wicklung durch zwei einfach geschlossene Wicklungen, deren Spulenseiten räumlich miteinander abwechseln, und von denen die eine an die geraden, die andere an die ungeraden Kommutatorsegmente angeschlossen ist.

Der Abstand zwischen den Hinführungen zweier unmittelbar miteinander verbundener Spulen ist der *Schritt* Y der Wicklung. Er setzt sich bei der Trommelwicklung aus den beiden Teilschritten y_1 und y_2 zusammen. y_1 ist der Abstand zwischen Hin- und Rückführung derselben Spule (zwischen den Mitten der Seiten einer Spule), y_2 ist der Abstand von der Mitte der Rückführung der ersten bis zur Mitte der Hinführung der zweiten Spule. Ist der zweite Teilschritt rückwärts gerichtet, also $Y = y_1 - y_2$, Abb. 165, so erhält man die *Schleifenwicklung*, ist er vorwärts gerichtet, so daß $Y = y_1 + y_2$, Abb. 166, so erhält man die *Wellenwicklung*. Bei der Schleifenwicklung ist der Gesamtschritt Y gleich der Verschiebung zweier benachbarter Wicklungselemente im Felde. Bei

der Wellenwicklung ist der Gesamtschritt etwas kleiner oder etwas größer als die doppelte Polteilung, die Abweichung ist gleich der Feldverschiebung zweier benachbarter Elemente.

(366) Stirnverbindungen. In den weitaus meisten Fällen wird die Trommel wicklung so ausgeführt, daß zwei Lagen von Leitern am Ankerumfang hergestellt werden, von denen jeweilig durch die Stirnverbindungen ein oberer mit einem unteren Leiter verbunden wird (Abb. 167). Liegen hierbei die Stirnverbindungen ganz oder nahezu in der Mantelfläche des Ankers, so heißt die Wicklung „Mantel-“ oder „Faß-“ oder „Oberflächenwicklung“ mit „Gitterkopf“, Abb. 168. Diese Ausführungsform ist die vorteilhafteste. Sind dagegen die Verbindungen auf den Stirnseiten des Ankers nach der Welle hin abgebogen, so heißt die Wicklung „Stirnwicklung“ mit „Gabelkopf“.

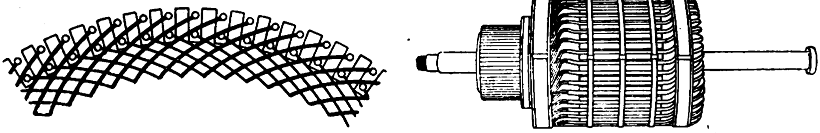


Abb. 167. Stirnverbindungen der Ankerwicklung. Abb. 168. Anker mit Zylinderwicklung.

(367) Darstellung der Wicklungen. Zeichnerisch wird die Wicklung im Wicklungsschema entweder durch eine Projektion auf eine zur Ankerachse senkrechte Ebene dargestellt, indem man den Anker etwa von der Kommutatorseite aus betrachtet, oder durch eine Abwicklung der Zylinderfläche, wobei die Polflächen schraffiert eingezeichnet werden können. Bedient man sich dabei der in Abb. 162 angegebenen Schraffur, so daß die Neigung der Linien auf den Nordpolflächen dem schrägen Strich des N entspricht, so findet man beim Vorbeibewegen des Wicklungsschemas vor den Polen die Richtung der induzierten EMK in Übereinstimmung mit dem scheinbaren Wandern der Schraffurlinien über die Leiter. Die übereinander liegenden Spulenseiten werden in der Regel im Schema dicht nebeneinander gezeichnet und zweckmäßig durch die Strichstärke unterschieden. Bei großen Ankern verursacht die Zeichnung des ganzen Schemas unverhältnismäßig viel Mühe, man bedient sich daher meistens einer Wicklungstabelle, die angibt, in welche Nuten Hin- und Rückführung der aufeinander folgenden Wicklungselemente gelegt werden sollen.

(368) Einteilung und Wicklungsregeln für Trommelwicklungen. Man mißt den Schritt, die Feldverschiebung und die Polteilung entweder durch die Zahl der Stäbe (Spulenseiten), die auf die zu messende Größe entfallen, Abb. 169a, oder besser durch die Zahl der Nuten, Abb. 169b, indem man annimmt, daß auf jede Nute zwei Stäbe oder Spulenseiten wie in Abb. 167 entfallen. Enthält eine Nute 4, 6 .... Spulenseiten, so löst man sie in 2, 3 ... Nuten auf und zählt dementsprechend, Abb. 169c. Ist ein Kommutator an die Wicklung angeschlossen, so stimmt bei der letzten Art der Zählung die Zahl der Nuten mit der Zahl der Kommutatorteile überein. Die Gesamtzahl der Spulenseiten auf dem Anker ist doppelt so groß wie die Zahl der Kommutatorteile m. Bei der Zählung nach Stäben hat der Gesamtschritt einen doppelt so großen Zahlenwert wie bei der Zählung nach Nuten, er muß eine gerade Zahl, die beiden Teilschritte müssen ungerade Zahlen sein. Im folgenden wird die Zählung nach Nuten angewendet. p ist die Zahl der Polpaare.

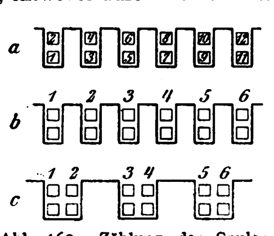


Abb. 169. Zählung der Spulen. a) Spulenseiten, b) eine Spule/Nut, c) zwei Spulen/Nut.

I. Schleifenwicklung.

A. Einfach geschlossen: $Y = \pm 1$ oder $Y = \pm i$, m nicht durch i teilbar.

B. Mehrfach geschlossen: $Y = \pm i$, Y und m durch i teilbar, Wicklung i-fach geschlossen.

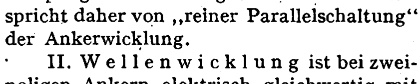
In beiden Fällen

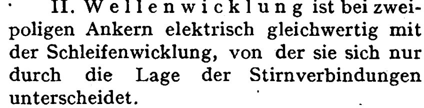
a) Durchmesserwicklung (lange Spulen). Die Stirnverbindung überbrückt ungefähr einen der Polteilung entsprechenden Bogen,

$$y_1 \approx \frac{m}{2p}.$$

b) Sehnenwicklung (kurze Spulen). Die Stirnverbindung überbrückt einen kleineren Bogen, als der Polteilung entspricht. Die Sehnenwicklung bietet den Vorteil einer geringeren Ankerrückwirkung (380) und einer nicht unbedeutenden Ersparnis an Kupfer und gesamter Ankerlänge, ist aber bei Maschinen mit Wendepolen (385) nicht zu brauchen. Die Spulenbreite muß mindestens etwas größer sein als der Polschuhbogen.

Wird die Schleifenwicklung auf mehrpolige Maschinen angewandt, so ergibt sich ein Anker, dessen Wirkung derjenigen gleich ist, die p parallelgeschaltete


zweipolige Maschinen geben würden. Man spricht daher von „reiner Parallelschaltung" der Ankerwicklung.


II. Wellenwicklung ist bei zweipoligen Ankern elektrisch gleichwertig mit der Schleifenwicklung, von der sie sich nur durch die Lage der Stirnverbindungen unterscheidet.

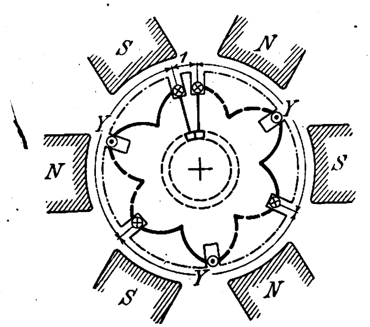


Abb. 170. Wicklungsschritte bei Wellenwicklung.

Reihenschaltung. Bei der mehrpoligen Wellenwicklung ist der Schritt Y ungefähr gleich der doppelten Polteilung τ, jedoch entweder etwas größer oder etwas kleiner; denn wäre er genau gleich der doppelten Polteilung, so würde sich die Wicklung schon nach einem Umgange schließen, während sie sich erst nach einer Anzahl von Umläufen schließen soll. Wenn p die Zahl der Polpaare ist, so möge die Feldverschiebung nach p Schritten eine Nut (vorwärts oder rückwärts), Abb. 170, betragen. Bei m Nuten auf dem Umfange ist demnach

$$pY = m \pm 1.$$

Beim Durchlaufen der ganzen Wicklung findet ein Richtungswechsel der EMK statt, wenn die gesamte Feldverschiebung gleich der Polteilung geworden ist. Da sich aber die Wicklung in sich schließt, wenn die Feldverschiebung gleich Y, d. h. ungefähr gleich der doppelten Polteilung geworden ist, so finden nur zwei Richtungswechsel der EMK statt, es sind daher immer nur zwei parallele Ankerzweige vorhanden. Man braucht bei Kommutatorankern aus diesem Grunde auch nur an zwei Stellen, die um die Polteilung voneinander entfernt sind, Bürsten aufzulegen. Um jedoch an Kommutatorlänge zu sparen, pflegt man die Bürsten, wenn sie leicht zugänglich sind, über den Umfang des Kommutators zu verteilen, wie bei der Schleifenwicklung, und die gleichpoligen Bürsten miteinander zu verbinden.

Reihenparallelschaltung (Arnold). Die Feldverschiebung kann bei Wellenwicklung nach einem Umgange auch größer als ein Ankerteil sein, nämlich gleich a Teilen. Dann ist

$$pY = m \pm a.$$

Die Feldverschiebung erreicht jetzt bereits nach Y/a Umläufen einen vollen Schritt. Wenn sich dann aber nicht schon die Wicklung in sich schließen soll, darf Y nicht durch a teilbar sein. Noch mehr: damit alle Windungen durchlaufen werden, bevor sich die Wicklung schließt, dürfen Y und a keinen gemeinsamen

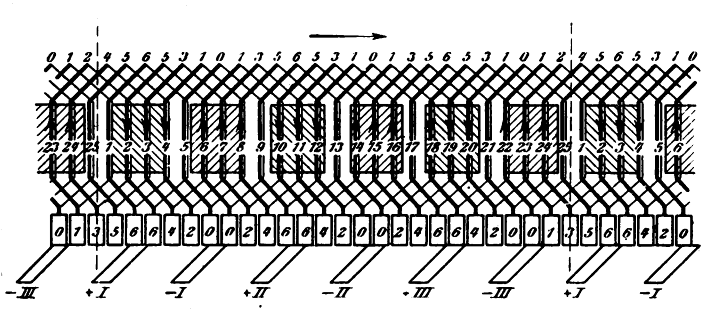


Abb. 171. Sechspolige Schleifenwicklung. $Y = 1$, $y_1 = 4$, $y_2 = 3$, $m = 25$, $p = 3$.

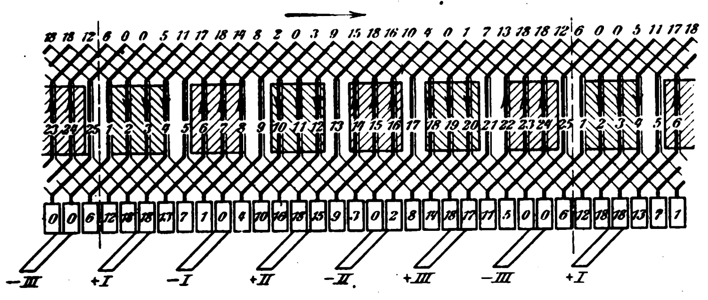


Abb. 172. Sechspolige Wellenwicklung, Reihenschaltung. $Y = 8$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $m = 25$, $p = 3$, $a = 1$.

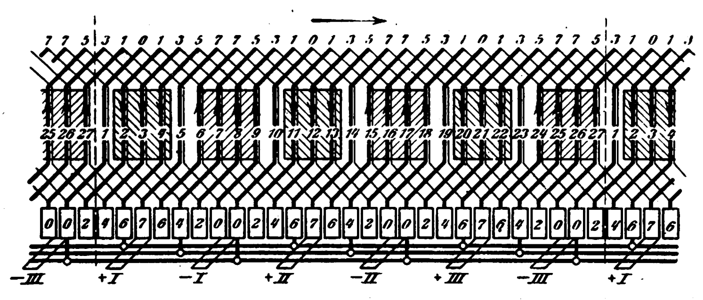


Abb. 173. Sechspolige Wellenwicklung, Reihenparallelschaltung mit Ausgleichverbindungen. $Y = 8$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $m = 27$, $p = 3$, $a = 3$.

Teiler haben. Andernfalls gibt der größte gemeinsame Teiler an, wie viel unabhängige in sich geschlossene Wicklungen auf dem Anker vorhanden sind. Da ferner bei einer Feldverschiebung um die doppelte Polteilung zwei Richtungswechsel der EMK stattfinden, so sind für je Y/a Umläufe zwei Stromabnahmestellen, also

für Y Umläufe, bei denen sich die Wicklung in sich schließt, $2a$ Stromabnahmestellen und mithin $2a$ Parallelstromkreise vorhanden. Die Stromabnahmestellen sind im allgemeinen nicht regelmäßig verteilt.

Für die Wellenwicklung gelten daher folgende Formeln.

A. Einfach geschlossene Reihenwicklung $pY = m \pm 1$

Y und m ohne gemeinsamen Teiler.

B. Einfach geschlossene Reihenparallelwicklung (Arnoldsche Wicklung):

$$pY = m \pm a$$

Y und m ohne gemeinsamen Teiler.

C. Mehrfach geschlossene Reihenwicklung:

Y und m durch i teilbar, i-fach geschlossene Wicklung.

In allen Fällen:

a) Durchmesserwicklung: $y_1 \approx \frac{Y}{2}$, $y_2 \approx \frac{Y}{2}$.

b) Sehnenwicklung. Der eine Teilschritt ist verkürzt, der andere vergrößert:

$$y_1 \gtrless \frac{Y}{2}, \quad y_2 \lessgtr \frac{Y}{2}.$$

Bestehen die Wicklungselemente aus Spulen, so werden die Verbindungen benachbarter Spulen entweder nach den Regeln der Schleifenwicklung oder der Wellenwicklung hergestellt. Beispiel der Wellenwicklung mit Spulen ist der übliche Straßenbahnmotor.

(369) Beispiele von Wicklungen. In den Abb. 171 bis 173 sind drei sechspolige einfach geschlossene Trommelwicklungen dargestellt. Setzt man die EMK jedes im Felde gelegenen Stabes gleich Eins, so ergeben sich die in die Kommutatorteile eingeschriebenen Potentiale, woraus sofort die Stellung der Bürsten und die Spannung der Maschine zu entnehmen ist. Man erkennt, daß bei der Reihenwicklung, Abb. 171, die gleichpoligen Bürsten durch nicht im Felde liegende Stäbe miteinander verbunden sind. Es genügen daher zwei Bürsten, etwa + I und − I oder − II.

(370) Ausgleichleitungen. Bei vielpoligen Maschinen ist es für die Güte des Betriebes wichtig, daß sich die Leistung gleichmäßig über die ganze Wicklung verteilt. Um den Ausgleich zu befördern, ordnet man Ausgleichleitungen (Äquipotentialverbindungen) an, die sich besonders bei Schleifenwicklung und bei Reihenparallelschaltung leicht anbringen lassen. Man verbindet durch Drahtringe, die z. B. zwischen Wicklung und Kommutator untergebracht werden, solche Punkte der Wicklung miteinander, die dauernd gleiches Potential haben, vgl. Abb. 173. Wichtig ist dabei eine theoretisch ganz regelmäßige Potentialverteilung, wie sie vorhanden ist, wenn m durch p teilbar ist. Bei Reihenschaltung ist dies nicht der Fall, Arnold fügt daher hier noch eine Hilfsschleife ein (vgl. Arnold, Dynamomasch., S. 60 ff.).

Schleifringe, Kommutator, Bürsten.

(371) Stromzuführung. Der Strom wird umlaufenden Wicklungen je nach Bedarf durch Bürsten und Schleifringe, von denen jeder nur die Verbindung mit einem oder einigen Punkten der Wicklung herstellen kann, oder durch Kommutatoren, die eine Einführung des Stromes an ständig wechselnden Punkten der Wicklung gestatten, entnommen oder zugeführt. Schleifringe werden aus Gußeisen, Bronze oder Kupfer hergestellt. Es ist bei größeren Durchmessern zu empfehlen, die Schleifringe zweiteilig zu machen, um die Auswechslung zu erleichtern; man vermeidet große Umfangsgeschwindigkeiten mit Rücksicht auf Verschleiß und

Leistungsverluste. Die Schleifringe werden auf isolierende Buchsen gesetzt, die Anschlußdrähte fest mit ihnen verschraubt und gegen die Fliehkräfte gesichert.

(372) Die **Kommutatoren** bestehen aus flachen Teilen A, Abb. 174, aus hart gezogenem Kupfer. Zur Isolation der einzelnen Teile dient Glimmer oder ein geeignetes Glimmerpräparat von 0,7—0,9 mm Stärke. Der Glimmer muß so ausgesucht werden, daß er sich ebenso stark abnutzt wie die Kupferteile, damit die Lauffläche des Kommutators glatt bleibt. Wird letztere unrund, so werden die auf dem Kommutator schleifenden Bürsten von den Unebenheiten stoßweise abgehoben, in Schwingungen versetzt, und es entstehen Funken. Die Kommutatorteile werden meist auf einer zweiteiligen Buchse aus Gußeisen aufgebaut, die durch Glimmerkappen von 1,5—5 mm Dicke isoliert und durch Anziehen der Spannschrauben verspannt wird (Abb. 174). Bei sehr großen Kommutatoren werden die Preßringe geteilt. In einzelnen Fällen verwendet man auch Preßstücke, die durch radiale Schrauben mit der Kommutatorbuchse verschraubt werden. Auch bei Erwärmung darf keine Veränderung irgendeines Teiles des Kommutators bemerkbar werden. Die Isolation der Kommutatorteile gegeneinander und gegen den Körper wird mit Hochspannung geprüft.

Gegen die Wirkung der Fliehkraft erhalten Kommutatoren mit sehr großer Umfangsgeschwindigkeit (z. B. bei Turbodynamos) Schrumpfringe aus Nickelstahl, zu deren Isolation Glimmer dient. (Abb. 298.)

Die radiale Abnutzungstiefe der Kommutatorteile ist reichlich zu bemessen, damit nach längerer Betriebsdauer durch Abdrehen erneut eine glatte Oberfläche des Kommutators hergestellt werden kann. Zweckmäßig ist es, auf der Ankerseite des Kommutators bei A, Abb. 174, einen Einschnitt einzudrehen, durch dessen Tiefe zugleich angedeutet wird, bis zu welchem geringsten Durchmesser abgedreht werden darf. Kommutatoren dürfen nie durch Schnitte parallel zur Achse geteilt werden. Es ist zweckmäßig, die Kommutatoren so zu bauen, daß die Innenseite von abkühlender Luft bestrichen wird. Sehr lange Kommutatoren können durch Lüftungsschlitze unterteilt werden. Bei dem Bau langer Kommutatoren ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß sich die Kommutatorteile bei Erwärmung ausdehnen können. Die Siemens-Schuckertwerke legen bei Turbodynamos je zwei auf einer Seite ausgehöhlte Teile so gegeneinander, daß sie einen zur Achse parallelen Kanal bilden, durch den Luft zur Kühlung gedrückt wird. Die Kommutatorbuchse wird zweckmäßig bei großen Maschinen mit dem Ankerkörper verschraubt, so daß Anker und Kommutator ein von der Welle unabhängiges Ganzes bilden. Bei kleinen Maschinen wird der Kommutator einfach mit Feder und Nut auf der Welle befestigt. Beim Betriebe werden die Kommutatoren durch Stromwärme im Übergangswiderstand zwischen Bürsten und Kommutator, durch die Reibung der Bürsten auf dem Kommutator und unter Umständen durch Wirbelströme in den Kommutatorteilen erwärmt. Zur Berechnung der Temperaturzunahme $\Delta\vartheta$ benutzt A r n o l d, la C o u r (Gleichstrommasch., 3. Aufl., Bd. 1, S. 689) die Formel

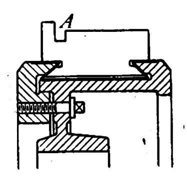


Abb. 174. Kommutator.

$$\Delta\vartheta = \frac{70 \text{ bis } 120}{1 + 0{,}1\, v_k} \cdot \frac{V_k}{S_k},$$

worin v_k die Kommutatorgeschwindigkeit in m/s, V_k die gesamten Verluste im Kommutator in Watt und S_k die Oberfläche des Kommutators in cm² bedeutet.

(373) Funkenbildung. Funken erhöhen die Erwärmung beträchtlich und führen zu schnellem Verschleiß, sie sind daher durchaus zu verhüten. Ist ein Kommutator abgedreht worden, so ist sorgfältig zu prüfen, ob die Drehspäne nicht die Isolation zwischen zwei Segmenten überbrückt haben. Solche Überbrückungen gefährden die Ankerwicklung und sind daher zu entfernen. Zum Abdrehen dient

ein spitzgeschliffener Stahl; nach dem Drehen schleift man mit Glaspapier (aber nicht Karborundum-Papier), event. bei Anwendung von etwas Öl, bis zur Herstellung einer spiegelglatten, hochglanzpolierten Oberfläche. Es empfiehlt sich, den Kommutator regelmäßig nach dem Betriebe mit feinstem Sandpapier ablaufen zu lassen, wobei man das Sandpapier mit Hilfe eines nach der Rundung des Kommutators geschnittenen Holzes, aber nicht unmittelbar mit den Fingern oder der Handfläche andrückt.

(374) Die **Bürsten** bestehen aus Kohle, Kupferblech, Kupferdraht, Kupfergaze, Kohle mit Metallblatteinlagen, gepreßten verkupferten Kohlenkörnern, Kupfergaze mit Graphitfüllung, Messing, Aluminium usw.

Metallbürsten haben den Vorteil, daß sie verhältnismäßig hohe Stromdichten an der Auflagestelle gestatten (25—35 A/cm²) und infolge ihrer Elastizität auch bei einem unrunden Kommutator eine innige Berührung gewährleisten. Dagegen arbeiten sie mit höherem Reibungskoeffizienten (im Mittel 0,5) als Kohlenbürsten, verursachen großen Verschleiß und bedingen sehr sorgfältige Wartung des Kommutators, wenn er nicht durch ungleichmäßige Abnutzung bald unbrauchbar werden soll. Bei Anwendung von Metallbürsten empfiehlt es sich, den Kommutator mit geeigneten Mitteln ganz leicht zu schmieren. Wenn der Kommutator mit wechselndem Drehsinn umläuft, so sind Metallbürsten in der Regel nicht verwendbar.

Kohlenbürsten gestatten nur geringe Stromdichten (5—15 A/cm²), sie arbeiten aber mit geringerem Reibungskoeffizienten (im Mittel 0,2) und verursachen infolge der schmierenden Wirkung des Graphits im allgemeinen geringen Verschleiß. Die Fabriken fertigen verschiedene Qualitäten an, die sich hinsichtlich der Härten und des Widerstandes unterscheiden; je höher die Maschinenspannung ist, um so größer pflegt man den Härtegrad und um so geringer die Leitfähigkeit der Kohle zu wählen. Für starke Ströme werden die Bürsten mit Metallzusätzen versehen. Mittlere Werte der zulässigen Stromdichten sind: für harte Kohlen 6 A/cm², für mittelweiche 12 A/cm², für weiche 15 A/cm², für Kohlen mit Metallzusätzen 25 bis 45 A/cm². Um den Stromübergang von der Kohle zum Bürstenhalter zu verbessern, verkupfert man vielfach die dem Kommutator abgewandte Seite der Bürste, im Betrieb soll aber die Verkupferung niemals mit dem Kommutator selbst irgendwie in Berührung kommen. Das Schmieren des Kommutators mit Öl oder dergl. ist bei Anwendung von Kohlenbürsten zu vermeiden.

Der Auflagedruck soll bei weichen Kohlen 150—250 g*/cm², bei harten 250 bis 400 g*/cm² betragen. Der Reibungskoeffizient ist nach Lisca (Arbeiten aus d. El. Inst. d. T. H. Karlsruhe, Bd. II): bei Graphit 0,06—0,20, bei Kohle 0,20—0,35, bei Metallgraphit 0,12—0,30, bei Metall 0,50. Er ist sehr stark von der Beschaffenheit des Kommutators abhängig.

Nach dem Einsetzen neuer Kohlen ist durch Aufschleifen dafür Sorge zu tragen, daß die beabsichtigte Auflagefläche auf dem Kommutator wirklich hergestellt wird.

(375) Übergangswiderstand. An jeder Bürsten-Auflagestelle entsteht ein Übergangswiderstand, dessen Größe sich mit dem Auflagedruck, der Umfangsgeschwindigkeit, der Stromrichtung und der Stromdichte ändert und zwar so, daß der Widerstand mit zunehmender Geschwindigkeit (nur, solange diese gering ist) und mit abnehmendem Auflagedruck größer wird (vgl. Dettmar, ETZ 1900, S. 429). Der Übergangswiderstand ist bei Kommutatoren größer als bei Schleifringen. Er ist von der Geschwindigkeit in beiden Fällen aus naheliegenden Gründen um so mehr abhängig, je weniger Kommutator oder Schleifring rund laufen, und je weniger gut der Bürstenhalter den Bewegungen des Kommutators folgt.

Der Übergangswiderstand hängt besonders stark von der Stromdichte, bei schnellen Änderungen von der effektiven Stromdichte ab. Er sinkt bei wachsender Stromdichte derart, daß der Spannungsverlust an der Bürste von der Strombelastung fast ganz unabhängig ist. Bei weichen Bürsten ist der Spannungsverlust an einer Bürste 0,8—1,2, bei harten 1,3—1,8 V. In der Richtung Metall-Kohle

ist er größer als in der Richtung Kohle-Metall. Feuer tritt nach L i s c a (ETZ 1909, S. 83) auf, wenn die Spannung einen bestimmten Wert, die Funkengrenze, überschreitet, die für jede Kohlensorte eine Konstante in Höhe von 14 (Kohle Anode) bis 22 V (Kohle Kathode) ist. Bei Überschreitung der Funkengrenze wächst der Widerstand stärker als vorher mit der Stromdichte.

(376) Die **Bürstenhalter** haben die Aufgabe, die Bürste mit passendem Auflagedruck in der richtigen Lage gegen den Kommutator zu drücken. Der Druck beträgt bei ortsfesten Maschinen für Kupferbürsten 120 g*/cm², für Kohlenbürsten 150 bis 400 g*/cm² (374); bei bewegten oder nicht erschütterungsfrei aufgestellten Motoren, z. B. Fahrzeugmotoren, kommen nur Kohlenbürsten in Frage, denen man einen Auflagedruck von mindestens 250 g*/cm² gibt. Ein übermäßiges Andrücken der Bürsten, zu dem die Maschinisten namentlich bei schlecht gepflegten

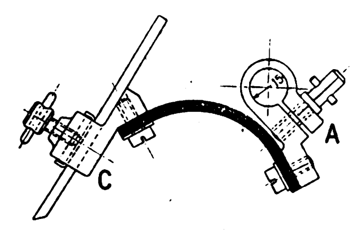


Abb. 175. Bürstenhalter, vorwiegend für Metallbürsten.

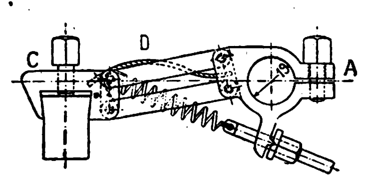


Abb. 176. Kohlenbürstenhalter, Kohlenbürste fest eingespannt.

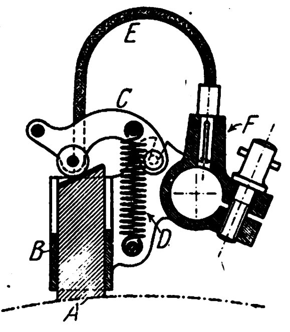
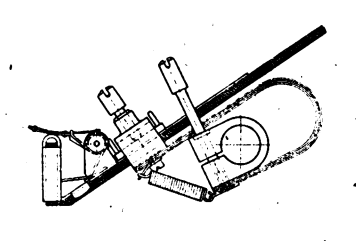


Abb. 177. Kohlenbürstenhalter, Kohlenbürste federnd gelagert.


Abb. 178. Kombinierter Metall- und Kohlenbürstenhalter.

Kommutatoren neigen, ist zu vermeiden. Die Bürstenhalter müssen eine Vorrichtung zur Einstellung der richtigen Lage und des richtigen Druckes besistzen, weiter müssen sie so eingerichtet sein, daß die Bürsten leicht ausgewechselt werden können. Die Führung der Bürste ist so zu gestalten, daß ein Aufkanten weder bei radialer noch bei tangentialer Verstellung oder Durchfederung des Bürstenhalters eintritt. Eine gewisse Beweglichkeit muß gewahrt bleiben, weil das Rundlaufen der Kommutatoren auf die Dauer nicht genau aufrecht zu erhalten ist. Die Federung soll daher eine gute sein; hart gefederte Bürsten verursachen schnellen Verschleiß und starkes Geräusch. Je leichter der Bürstenhalter, um so besser kann er geringen Ungleichheiten der Kommutatoroberfläche folgen.

Abb. 175 zeigt einen Bürstenhalter für tangential anliegende Bürsten, meist für Metallbürsten angewandt. Abb. 176 und 177 zeigen typische Konstruktionen für Kohlenbürstenhalter.

Abb. 178 zeigt einen Doppelbürstenhalter von Schuckert, der gestattet, bis zu einem gewissen Grade die Vorzüge der Metallbürste mit denen der Kohlenbürste zugleich auszunützen.

(377) Bürstenträger. Die Bürstenhalter werden meist mit Klauen, seltener mit Schwalbenschwänzen am Bürstenstift befestigt. Der Bürstenstift oder Bürstenbolzen wird aus Eisen, hin und wieder auch aus Messing oder Kupfer hergestellt. Er ist kräftig zu halten, damit er nicht schwingt. Die freitragende Länge der Bürstenstifte sollte über ein gewisses Maß nicht hinausgehen; bei sehr langen Kommutatoren müssen die Bürstenstifte beiderseits mit Tragringen verschraubt werden, so daß eine Art Käfig entsteht. Die Isolation der Bürstenstifte gegen den sie tragenden Bürstenträger besteht in Buchsen aus Stabilit, Vulkanasbest, Eisengummi, Mikanit usw., die allenthalben einige Millimeter über die Metallteile herausstehen sollen. Die Buchsen müssen möglichst mit übergreifenden Kanten ausgeführt werden, weil stumpfgestoßene Kanten in der Regel zu Durchschlägen Veranlassung geben.

Die Bürstenträger werden am Motorgehäuse oder am Lagerschild durch Schrauben befestigt oder in Form von sogenannten Brillen ausgeführt und auf das Lager gesetzt (Abb. 179). Verstellbarkeit der Bürsten ist bei neueren Maschinen vielfach nicht mehr erforderlich. Ist sie doch nötig, so wird die Bürstenbrille kleinerer Abmessung nach Lockern einer Klemmschraube von Hand, der Bürstenträger großer Maschinen mittels Schraubenspindel und Mutter verschoben. Die Bürstenträger werden häufig zugleich zur Befestigung von Sammelschienen benutzt, die zur Verbindung der gleichpoligen Bürstenstifte dienen.

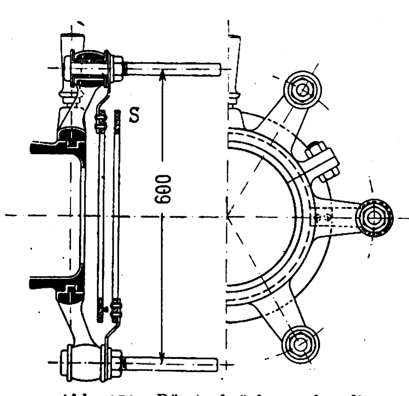


Abb. 179. Bürstenbrücke, sechspolig.

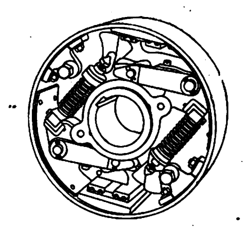


Abb. 180. Zentrifugalkurzschließer.

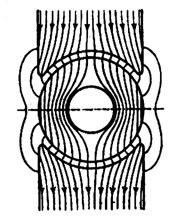
(378) Kurzschließer. Bedarf man der Anwendung von Schleifringen und Bürsten nur während bestimmter Zeiten, z. B. beim Anlassen von Motoren, so verwendet man Vorrichtungen, die zugleich das Abheben der Bürsten und das Kurzschließen der Schleifringe ermöglichen, vgl. Abb. 258. Einen selbsttätigen Kurzschließer der Siemens-Schuckertwerke, besonders für Gegenschaltung bei Induktionsmotoren (522), zeigt Abb. 180.

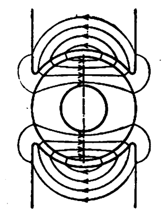
(379) Zur **Stromab- und -zuführung** zur Maschine als solcher werden entweder Anschlußseile vorgesehen oder Klemmen angebracht. Die Klemmen sind mit Rücksicht auf die jeweilige Stromstärke zu bemessen und so anzubringen, daß sowohl eine bequeme Zuführung der äußeren Leitungen möglich — in der Regel ist es dafür am zweckmäßigsten, die Klemmen am unteren Teil der Maschine anzubringen — als auch ein Kurzschließen durch zufällig auf die Klemmen fallende oder aus Unachtsamkeit oder Unkenntnis darauf gelegte Metallteile ausgeschlossen ist. Bei Wechselstrommaschinen ist darauf zu achten, daß die durch Eisenteile der Maschine, z. B. durch das Gehäuse, zu führenden Leitungen stets durch ein

gemeinsames Loch gehen, andernfalls entstehen infolge wechselnder Magnetisierung starke Verluste und örtliche Erwärmungen durch Hysterese und Wirbelströme.

Ankerrückwirkung und Kommutierung bei den Kommutatormaschinen.

(380) Ankerrückwirkung. Durch den Ankerstrom wird bei Belastung auch die Ankerwicklung zum Sitz einer magnetomotorischen Kraft, die bei Leerlauf nicht vorhanden war. Der magnetische Zustand der Maschine ändert sich dadurch, und zwar stets so, daß eine Verzerrung des bei Leerlauf vorhandenen magnetischen Feldes auftritt. Bei einer zweipoligen Anordnung stellt Abb. 181a den Verlauf der Induktionslinien bei Leerlauf, Abb. 181b den Verlauf der Induktionslinien dar, die vorhanden sein würden, wenn das Ankerfeld allein bestände, Abb. 181c endlich den Verlauf der Linien ber Belastung. Das magnetische Feld im Luftraum ist unter der einen Polkante verstärkt, unter der anderen abgeschwächt. Bei Generatoren wird es unter der ablaufenden Polkante verstärkt, unter der auflaufenden geschwächt, bei Motoren verhält es sich umgekehrt, weil sich der Motor bei gleicher Richtung des magnetischen Feldes und bei gleicher Richtung der Ankerströme umgekehrt dreht wie der Generator.





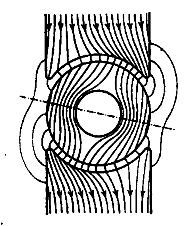


Abb. 181. Verlauf der magnetischen Linien.

a. Feldmagnete allein erregt (Hauptfeld). b. Anker allein erregt (Querfeld). c. Feldmagnete und Anker erregt (Resultierendes verzerrtes Feld).

Nach Abb. 182 kann man die Ankerwindungen in zwei Gruppen zerlegen, nämlich eine, die in dem Winkel $\alpha\alpha$ liegt und entmagnetisierend wirkt, und eine Gruppe, die in dem Winkel $\beta\beta$ liegt und quermagnetisierend wirkt. Die Größe der Winkel hängt von der Bürstenverstellung ab; die Gegenkomponente verschwindet im allgemeinen, wenn die Bürsten in der neutralen Zone, d. h. in der Mitte zwischen den Polen aufliegen. Näherungsweise zerlegt man wohl die gesamte Durchflutung nach dem Parallelogramm der Kräfte. Um die Bürsten auf funkenfreien Gang einzustellen, muß man sie bei einem Generator in der Drehrichtung verschieben, die Gegenkomponente wird dadurch vergrößert und schwächt den ursprünglich vorhandenen Magnetismus ab. Bei Motoren werden die Bürsten durch Verdrehung gegen die Drehrichtung auf funkenfreien Gang eingestellt, weil bei gleichen Richtungen des Magnetismus und der Ankerstromstärke der Motor mit seinem eigenen, der Stromerzeuger gegen sein eigenes Drehmoment läuft. Der ursprünglich vorhandene Magnetismus wird dadurch wieder abgeschwächt.

Bei den synchronen Wechselstrommaschinen wirkt die Phasenverschiebung ähnlich wie die Bürstenverschiebung bei den Kommutatormaschinen, vgl. (448).

(381) Die magnetischen Felder. An jeder Stelle des Ankerumfanges können wir ein von den Feldmagneten, ein von den Ankerströmen herrührendes und ein aus beiden resultierendes Feld unterscheiden. Bei geringer Sättigung des

Eisens ist die von den Feldmagneten herrührende Feldstärke bei der radialen Dicke δ cm des Luftspaltes unter den Polen

$$\mathfrak{H}_f = \frac{0{,}4\,\pi\, m_f\, I_f}{2\,\delta},$$

wenn m_f die Windungszahl eines Polpaares ist. Zwischen den Polen ist das Feld weit schwächer, vgl. Kurve P_0, P_1 ... P_8, Abb. 183.

Setzt man einen Kommutatoranker in einen ihn gleichmäßig umschließenden Eisenring, so daß der Luftspalt überall dieselbe radiale Dicke δ hat, so ist bei geringer Eisensättigung die Stärke des Ankerfeldes in der Mitte zwischen zwei ungleichnamigen Stromabnahmestellen gleich Null und wächst linear bis zu diesen Stellen, Linie $A_1 A_2 A_3$, Abb. 183. Die Spitzen sind aber wegen der magnetisierenden Wirkung der durch die Bürsten kurzgeschlossenen Windungen parabolisch abgerundet und unter Umständen verschoben. Setzt man die Ströme in diesen Windungen gleich Null, so sind die Spitzen abgeflacht, und die magnetomotorische

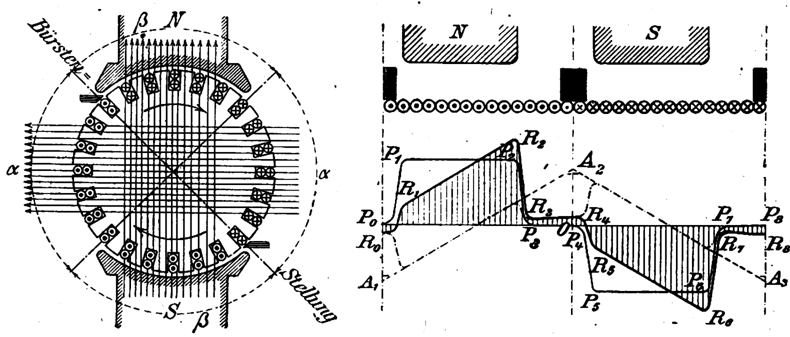


Abb. 182. Querfeld und Gegenfeld des Ankers bei Bürstenverschiebung.

Abb. 183. Aus Erregerfeld und Ankerfeld resultierendes Feld.

Kraft ist gleich $0{,}4\,\pi\, m_a I_a$, wenn m_a die Zahl der Windungen eines Polpaares (die kurzgeschlossenen nicht mitgerechnet) auf dem Anker und I_a die Stärke des in ihnen fließenden Stromes ist. Der höchste Wert der Ankerfeldstärke ist daher

$$\mathfrak{H}_{a\,max} = \frac{0{,}4\,\pi\, m_a I_a}{2\,\delta} = \frac{0{,}1\,\pi \cdot m_a I_B}{\delta},$$

wenn I_B der gesamte Strom an einer Abnahmestelle ist. $\mathfrak{H}_{a\,max}$ darf auf keinen Fall größer als $\mathfrak{H}_f$ sein, weil sich sonst die Richtung des resultierenden Feldes unter der auflaufenden Polkante umkehren könnte. Bei ausgeprägten Polen bildet sich dies Ankerfeld wieder nur unter den Polen in voller Stärke aus, zwischen ihnen nimmt es geringe Werte an.

Das aus beiden Feldern resultierende Feld ist durch die Kurve R_0, R_1 ... R_8 (Abb. 183) dargestellt. Bei geringer Sättigung des Eisens, besonders auch in den Zähnen, wird durch diesen Linienzug auch die magnetische Induktion dargestellt. Man erhält dann in der Fläche, die sie mit der Abszissenachse einschließt, ein Maß für den Induktionsfluß Φ im Luftspalt. Wegen der starken Sättigung in den Zähnen kann dieser Wert aber nur als erste Annäherung gelten. Auch kann deswegen die Abschwächung des Feldes auf der einen Seite unter dem Pole — unter der auflaufenden Kante — wohl voll eintreten, nicht aber die Verstärkung unter der anderen Seite. Näheres hierüber in (382).

Die Folge davon ist eine Verminderung des Induktionsflusses auch dann, wenn die Bürsten genau in der neutralen Zone stehen, also die Gegenkomponente des Ankerfeldes verschwindet. Die EMK im Anker sinkt daher mit wachsender Belastung und kann nur durch Verstärkung der Erregung wieder auf die alte Höhe gebracht werden. Dadurch wächst aber auch die Streuung zwischen den Polen und insbesondere zwischen den Polschuhen. Die Streuung trägt aber wesentlich zur Sättigung der Feldmagnete bei. Es ist daher wichtig, darauf zu achten, daß die magnetische Induktion in den Feldmagneten nicht den Sättigungsgrad erreicht, oberhalb dessen es nur durch große Verstärkung der Erregung möglich ist, den für die Erzeugung der verlangten Spannung erforderlichen Induktionsfluß herzustellen. Unter Umständen ist es nachträglich möglich, durch Einlegen von Blechen zwischen Schenkel und Joch den Luftspalt zu verkleinern und dadurch Abhilfe zu schaffen. Abgesehen von der Sättigung läßt Abb. 183 deutlich erkennen, daß eine Verschiebung der Bürsten — bei den Generatoren im Sinne der Drehung, bei den Motoren im entgegengesetzten — den resultierenden Induktionsfluß verkleinert, und zwar um so mehr, je stärker der Ankerstrom ist.

(382) Genauere Bestimmung des Induktionsflusses. Wir nehmen an, daß alle Nord- und Südpole ganz gleich ausgebildet seien, so daß wir nur den halben magnetischen Kreis zu betrachten brauchen. Eine von Mitte Joch der Feldmagnete bis Mitte Joch des Ankers verlaufende Induktionslinie wird bei Leerlauf durch die Durchflutung $(mI)_f/2$ eines Poles erregt. Bei Belastung der Maschine tritt noch ein Teil der Ankerdurchflutung hinzu. Wir können ihn durch die Ordinate der Kurve $A_1A_2A_3$, Abb. 183, an der betreffenden Stelle ausdrücken, wenn der Höchstwert der Ordinate $m_a I_a$ ist. Nach Hopkinson gilt dann für eine Induktionslinie, die um den Bogen x von der Mitte des Nordpoles entfernt den Luftraum durchsetzt, die Gleichung

$$\frac{1}{2}(mI)_f + (m_a I_a)_x = \frac{1}{0{,}4\,\pi}\,\mathfrak{B}_L\,\delta + \Sigma\left(\frac{\mathfrak{B}_E}{0{,}4\,\pi\cdot\mu_E}\cdot l_E\right). \qquad (1)$$

δ ist die Dicke des Luftspaltes in cm, die Summe bezieht sich auf den Pfad im Eisen von Jochmitte zu Jochmitte. $\mathfrak{B}_L$ in der Luft und $\mathfrak{B}_Z$ in den Zähnen hängen von x ab, die übrigen Größen $\mathfrak{B}_E$ und μ_E sind dagegen als unabhängig von x anzusehen, weil sich der Induktionsfluß in dem Polschaft und den Jochen sofort gleichförmig verteilt, vgl. Abb. 181 c. Die linke Seite kann man durch einen Linienzug $R_0R_1\ldots R_a$, Abb. 183, angeben. Man könnte daher $\mathfrak{B}_L$ und $\mathfrak{B}_Z$ in den Zähnen berechnen, wenn die übrigen $\mathfrak{B}_E$ bekannt wären. Da dies nicht der Fall ist, muß man ein Näherungsverfahren anwenden. Man berechne Φ_L angenähert nach dem in (381) angegebenen Verfahren. Indem man Φ_L mit dem Schaftquerschnitt und den doppelten Jochquerschnitten dividiert, findet man die zugehörigen Induktionen. Man kann nunmehr aus Gl. (1) $\mathfrak{B}_L$ und $\mathfrak{B}_Z$ für jeden Wert von x bestimmen, hiermit aufs neue Φ_L berechnen und damit den Rechnungsgang noch ein- oder zweimal wiederholen. Im allgemeinen wird die Bestimmung von $\mathfrak{B}_L$ und $\mathfrak{B}_Z$ an drei Stellen der Polschuhfläche genügen, um danach die Kurve $R_0R_1\ldots R_a$ korrigieren zu können. Für die Sättigung in den Schenkeln und dem Joch der Magnete ist zu beachten, daß der Fluß Φ_L um die Streuung zwischen den Polen vergrößert wird, die nach (310) zu berechnen ist. Man erhält auf diese Weise den Induktionsfluß Φ_L im Luftspalt und seine Verteilung längs der Oberfläche in Abhängigkeit von der Erreger- und der Ankerstromstärke. Ist der Induktionsfluß gegeben, so hat man die Rechnung für verschiedene — etwa 3 — Erregerstromstärken durchzuführen, um daraus durch Interpolation die richtige Erregerstromstärke zu ermitteln.

(383) Ankerstreuung. Für die Induktion der EMK kommt nur der Teil von Φ_L in Betracht, der von den Ankerwindungen umschlungen wird. Wir nennen ihn Φ_a. Ein Teil des in einen Zahn eintretenden Flusses läuft durch den ganzen Zahn, ein Teil Φ_s aber wird, in Abb. 184 nach links, abgelenkt, tritt, ohne die in

der Nut liegenden Drähte zu umschlingen, in den nächsten Zahn und läuft nun diesen Zahn entlang. Dieser letztere Teil ist also im ersten Zahn Streuung, im zweiten Zahn nützlicher Fluß. Die zwischen je zwei benachbarten Zähnen übergehende Streuung Φ_s ist der magnetischen Potentialdifferenz zwischen ihnen proportional. Diese aber kann nach (310) Satz 2 der mit $0{,}4\,\pi$ multiplizierten Durchflutung $z_Z I_a$ der Nut zwischen den beiden Zähnen gleich gesetzt werden. Ist der magnetische Widerstand des Streuflusses $\mathfrak{R}_s$, so ist demnach

$$\Phi_s = \frac{0{,}4\,\pi z_Z I_a}{\mathfrak{R}_s}.$$

Da alle Nuten unter einem Pol dieselbe Durchflutung haben, so kann man sich vorstellen, daß zwei Flüsse einander kreuzten, der nützliche Fluß und der Streufluß. Im allgemeinen wird der Fluß durch die Zähne nicht geändert, es geht nur ein Fluß, der an der einen Polkante eintritt, quer von Zahn zu Zahn unter dem Pol entlang zum benachbarten Pol. Demnach ist einfach

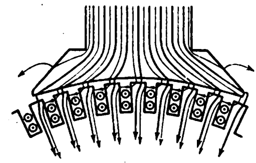


Abb. 184. Ankerfeld und Ankerstreuung.

$$\Phi_a = \Phi_L - \Phi_s$$

zu setzen.

Zur Berechnung von $\mathfrak{R}_s$ ist der ganze Pfad in eine Anzahl paralleler Teile zu zerlegen, deren magnetische Leitwerte zunächst bestimmt werden. Der reziproke Wert ihrer Summe ist $\mathfrak{R}_s$. Es kommen besonders folgende Teile in Betracht: Steg oder Nutenöffnung, Teil zwischen Nutenöffnung und Drähten, Nute selbst [von diesem Teil ist nur der dritte Teil der Leitfähigkeit einzusetzen, um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß diese Induktionslinien nur einen Teil der Windungen umschlingen], Luftspalt zum gegenüberliegenden Teil und zurück. Dieser letztere, auch Zickzackstreuung genannte Teil liefert im allgemeinen den größten Betrag und darf nicht vernachlässigt werden. Endlich kommt noch die sogenannte Flankenstreuung in Betracht, d. h. der Teil, der an den Stirnseiten des Ankers aus- und eintritt, und der den außerhalb des Eisens liegenden Teil der Wicklung umgibt. Nach (327) findet man ferner

$$\nu_1 = 1 + \tau_1, \quad \nu_2 = 1 + \tau_2, \quad \sigma = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2}.$$

(384) Kompensierung des Ankerfeldes (Menges, Fischer-Hinnen). Bringt man an den Feldmagneten eine ruhende Wicklung von derselben Windungszahl wie die der Ankerwicklung an, die von denselben Strömen, aber in entgegengesetzter Richtung durchflossen wird, wie die konzentrisch innerhalb ihrer liegende Ankerwicklung, so kann die Wirkung der Ankerwicklung ganz oder — der Streuung wegen — angenähert aufgehoben werden. Die Stromstärke in der Kompensationswicklung kann durch einen zu dieser parallel geschalteten Widerstand eingestellt werden. Versieht man nach Déri (vgl. ETZ 1902, S. 817) den Feldmagnet nicht mit ausgeprägten Polen, sondern stellt man ihn aus einem Ring mit inneren Nuten her, so liegen die Haupterregerwicklung und die Kompensationswicklung zueinander wie die zwei Wicklungen einer Zweiphasenmaschine.

Hat die Maschine ausgeprägte Pole, so wird die Kompensationswicklung ebenfalls in Nuten an der Oberfläche der Pole untergebracht, aber zwischen den Polen weggelassen. Abb. 185 zeigt die Anordnung der Erregerwicklung E und der Kompensationswicklung K bei einer Dérimaschine, Abb. 186 bei einer Maschine mit ausgeprägten Polen.

(385) Wendepole (Swinburne). Will man das Ankerfeld nur in einem kleinen Bereich, in der Gegend der neutralen Zone kompensieren, so genügen dazu besondere kleine Pole WP, Abb. 186, die an das Joch der Feldmagnete angeschraubt sind und vom Ankerstrom erregt werden, oder Wendezähne Z, Abb. 185.

Häufig findet man sowohl die Kompensationswicklung als auch Wendepole bei derselben Maschine angebracht. Bei der Déri-Anordnung bilden einzelne starke Zähne Z die Wendepole. Beide Anordnungen dienen besonders zur Erzielung einer guten Kommutierung.

(386) Die Kommutierung.[1]) Während sich die Kommutatorteile, Abb. 187 von links nach rechts unter der Bürste fortbewegen, werden beständig Wicklungselemente A_1A_2, A_2A_3, ... vom linken Teile der Ankerwicklung ab- und dem rechten Teile zugeschaltet. Dabei schließt die Bürste eine oder mehrere Ankerspulen während der Zeit des Vorüberganges vor der Bürste kurz und es tritt eine

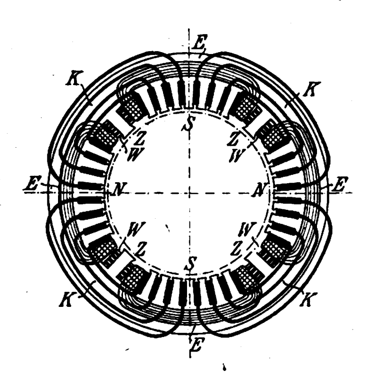


Abb. 185. Feldmagnete, den Anker möglichst gleichmäßig umschließend, mit Erreger-, Kompensations- und Wendepolwicklung.

Abb. 186. Feldmagnet mit ausgeprägten Polen, mit Erreger-, Kompensations- und Wendepolwicklung.

einfache oder mehrfache Stromverzweigung ein, denn der Strom, der links von A_1 die Stärke I_a hat, teilt sich im Punkte A_1 in die Teile i_1 und i_{12}, der Strom i_{12} teilt sich im Punkte A_2 in i_2 und i_{23} usw. Die Ströme i_{12}, i_{23}, i_{24}, ... müssen dabei an Stärke abnehmen, ihre Richtung umkehren und wieder zunehmen, und die Kommutierung besteht darin, daß der Strom in einem Element während der Dauer T des Kurzschlusses von der Stärke $-I_a$ auf die Stärke $+I_a$ gebracht

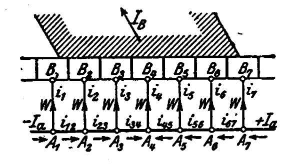


Abb. 187. Stromverlauf bei der Kommutierung.

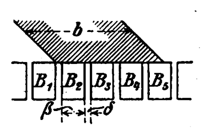


Abb. 188. Kommutatorteile und Bürste.

wird, wenn I_a die Stärke der in zwei einander benachbarten durch die kurzgeschlossenen Ankerspulen voneinander getrennten Ankerzweigen ist. Aus der Bürste fließt der Strom $I_B = 2I_a$.

(387) Die Kurzschlußdauer. Es bedeute b die Bürstenbreite, β die Breite eines Kommutatorteiles, δ die Dicke der Isolationsschicht zwischen zwei Kommutatorteilen, τ die Zeit, die verstreicht, während der Kommutator um die Kommutatorteilung $(\beta + \delta)$ weiter gelangt, T die Dauer des Kurzschlusses einer Anker-

[1]) Literatur siehe S. 267.

spule, v_k die lineare Kommutatorgeschwindigkeit, m die Zahl der Kommutatorteile, n die Drehzahl in U/min. Dann ist

$$v_k = m(\beta + \delta)\frac{n}{60} = \frac{\beta + \delta}{\tau} \qquad (1)$$

Der Kurzschluß zwischen B_1 und B_2, Abb. 188, beginnt, wenn die linke Bürstenkante die rechte Kante von B_1 berührt, und endigt, wenn die rechte Bürstenkante die linke Kante von B_2 verläßt. Die Bürste legt dabei den Weg $(b - \delta)$ zurück und braucht dazu die Zeit T. Daher ist

$$v_k = \frac{b - \delta}{T}. \qquad (2)$$

Aus (1) und (2) folgt

$$\tau = \frac{60}{mn} \quad \text{und} \quad T = \frac{60(b-\delta)}{mn(\beta+\delta)} = \frac{b-\delta}{\beta+\delta}\cdot\tau \qquad (3)$$

Vernachlässigt man δ, so ist

$$T = \frac{60\,b}{mn\beta} = \frac{b}{\beta}\tau. \qquad (4)$$

Es ist zu empfehlen, b/β gleich einer ganzen Zahl zu wählen. τ ist im Mittel 0,00075 s, bei langsam laufenden Maschinen größer, bei schnellaufenden geringer, bei Turbodynamos etwa 0,00033 s. Die Zahl m der Kommutatorteile beträgt für ein Polpaar etwa 70, bei Schleifenwicklung ist m etwas geringer, bei Wellenwicklung etwas größer.

(388) Lineare Kommutierung. Die Kommutierung ist gut, wenn die Stromdichte unter der Bürste nirgends den zulässigen Wert überschreitet, vgl. (374). Am besten ist es, wenn sie überall gleich groß ist. Es müssen dazu von allen Kommutatorteilen, die ganz von der Bürste bedeckt sind, gleich starke Ströme abgegeben werden, von dem auflaufenden und dem ablaufenden Teile dagegen Ströme, deren Stärken den von der Bürste bedeckten Teilen proportional sind. Der Strom i_1 muß demnach linear wachsen, i_{12} also linear abnehmen. Wenn i_2 konstant sein soll, muß i_{23} ebenfalls linear abnehmen. Während der Zeitdauer τ stellt daher zur Zeit t in Abb. 189a OA den Strom $-I_a$, OB den Strom i_{12}, OC den Strom i_{23} usw. dar, während AB den Strom i_1, BC den Strom i_2 usw. darstellt. OG stellt den Strom $+I_a$ dar. Nach der Zeit τ wird aber der Strom i_{12} zum Strom i_{23}, der Strom i_{23} zum Strom i_{34} usw., ferner der Strom i_1 zum Strom i_2, der Strom i_2 zum Strom i_3 usw. Betrachtet man daher die Zeitdauer $T = g\tau$, so erhält man, Abb. 189b, in der schrägen Geraden die Darstellung des linearen Verlaufes des Stromes eines Wicklungselementes, weil sich die einzelnen geraden Strecken A_1B_2, B_1C_2, ... zu einer einzigen Geraden zusammenschließen. Ferner zeigt Abb. 189c den Verlauf des Stromes i_1 oder i_2 oder ... in einer der Verbindungsleitungen zum Kommutator. In ihnen dauert der Strom, wenn die Bürstenbreite ein genaues Vielfaches der Kommutatorteilung ist, die Zeit $(g+1)\tau = (T+\tau)$. An der Konstruktion der Abb. 189 ändert sich nichts, wenn die Bürstenbreite nicht ein genaues Vielfaches der Kommutatorteilung ist.

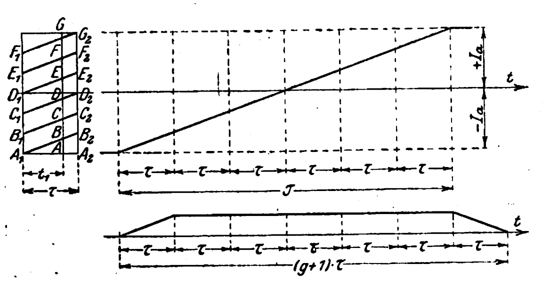


Abb. 189. Stromverlauf bei linearer Kommutierung.

(389) Verfrühte und verspätete Kommutierung. Steigt der Strom in einer Ankerspule zuerst schneller an, als der linearen Kommutierung entspricht, so daß der Verlauf durch die unterste Kurve der Abb. 191a dargestellt wird, so spricht man von verfrühter, im entgegengesetztem Falle, Abb. 191c, von verspäteter Kommutierung. Man kann aus der Kurve für den Kurzschlußstrom leicht die Kurve für den Strom in den Verbindungsleitungen konstruieren. Man trägt von dem Punkte A_0 (Abb. 190b) in dem der Kurzschluß beginnt, so oft die Strecke τ auf der Abszissenachse ab, bis der Punkt F_0 erreicht oder überschritten ist, in dem die Kommutierung beendet ist, zieht durch die so gewonnenen Punkte $B_0 C_0 \ldots$ Senkrechte zu der Abszissenachse und schneidet die Abbildung längs dieser Linien auf. Legt man dann die Streifen (aus Pauspapier) übereinander, Abb. 190a, so erhält man in den Abschnitten zwischen den Kurvenstücken die Ströme in den Ver-

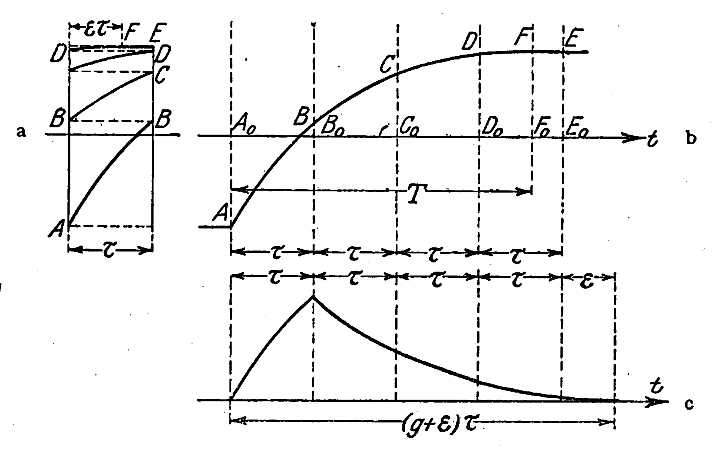


Abb. 190a bis c. a) Verfrühte Kommutierung, b) Kurzschlußstrom, c) Strom in den Verbindungsleitungen.

bindungsleitungen, Abb. 190c. Abb. 191a und 191c zeigen in den oberen stärker ausgezogenen Kurven die Ströme i_α in den Verbindungsleitungen. Man erkennt aus den Abbildungen, daß bei verfrühter Kommutierung die hinteren Verbindungsleitungen sehr schwache, unter Umständen sogar negative Ströme führen. In dem ersten Fall ist die Bürstenbreite b unnötig groß, im zweiten sogar schädlich. Dasselbe gilt bei der verspäteten Kommutierung für die vorderen Verbindungsleitungen.

Die Verbindungsleitungen können fehlen, indem Anfang und Ende der Ankerspulen unmittelbar an die Kommutatorteile angeschlossen werden; die Ströme, die wir in den Verbindungsleitungen gefunden haben, gelten aber auch für die zugehörigen Kommutatorteile. Die verfrühte Kommutierung hat daher eine größere Stromwärme an der auflaufenden, die verspätete eine solche an der ablaufenden Kante zur Folge, was zum Glühendwerden der Kanten führen kann. Auch bei Leerlauf können die Ströme sehr stark werden und große Verluste erzeugen.

(390) Der zusätzliche Strom. Verläuft der Kurzschlußstrom i_k nicht linear, so kann man ihn in zwei Teile zerlegen, von denen der erste den Kurzschlußstrom bei linearer Kommutierung, der andere den zusätzlichen Strom darstellt. Die Summe beider gibt den wahren Kurzschlußstrom. Die magnetisierende Wirkung der ersten Komponente beschränkt sich darauf, daß die Ankerfeldkurve, die ohne Berücksichtigung der Kurzschlußströme an den Spitzen abgeflacht

erscheint, parabolisch abgerundet wird. Die zusätzlichen Kurzschlußströme verschieben dagegen die Ankerfeldkurve, erzeugen also eine Querkomponente des Ankerfeldes. Bei Generatoren ist diese Querkomponente bei verfrühter Kommutierung ebenso wie das Hauptfeld gerichtet und wirkt daher magnetisierend, bei verspäteter Kommutierung ist sie gegen das Hauptfeld gerichtet und wirkt entmagnetisierend. Bei Motoren ist die Wirkung umgekehrt. Ebenso kann man den Strom in den Verbindungsleitungen in die bei linearer Kommutierung vorhandene und die zusätzliche Komponente i_z, Abb. 191a u. 191c zerlegen.

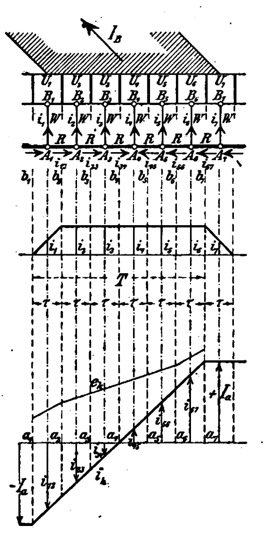


Abb. 191a. Verfrühte Kommutierung.

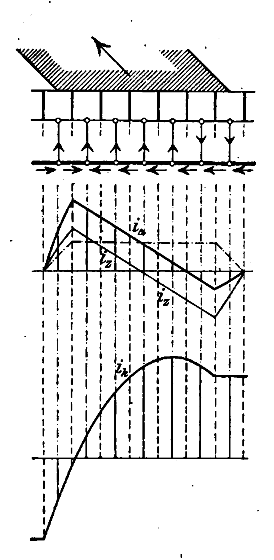


Abb. 191b. Lineare (normale) Kommutierung.

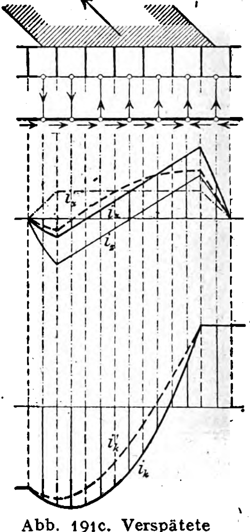


Abb. 191c. Verspätete Kommutierung.

(391) Die Strom- und die Spannungsgleichungen. Nach dem ersten Kirchhoffschen Gesetz hat man

$$i_{12} - i_1 + I_a = 0$$
$$i_{23} - i_{12} - i_2 = 0$$
$$i_{34} - i_{23} - i_3 = 0$$
$$\cdots\cdots\cdots$$
$$I_a - i_{g,\,g+1} - i_{g+1} = 0.$$

Durch Addition folgt hieraus der Gesamtstrom I_B einer Stromabnahmestelle

$$i_1 + i_2 + i_3 + \cdots + i_{g+1} = 2 I_a = I_B.$$

Nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz erhält man für jede Masche eine Gleichung, für die erste z. B.

$$W i_1 - W i_2 + R i_{12} + p_1 - p_2 = e_{12}$$

wenn p_1 und p_2 die Übergangsspannungen zwischen den Kommutatorteilen und der Bürste, positiv nach der Bürste hin gerechnet, sind, e_{12} die gesamte in der Ankerspule induzierte EMK ist. Bei linearer Kommutierung ist $i_1 = i_2$, $p_1 = p_2$, also $R i_{12} = e_{12}$. Es muß daher in den Ankerspulen während der Kommutierung eine EMK auftreten, die mit negativen Werten beginnt, linear wächst und im

Mittel gleich Null ist. Sie ist aber nur niedrig, weil R ein sehr kleiner Widerstand ist. Bei den verwickelten Verhältnissen wird man kaum jemals erreichen können, daß die wirklich vorhandenen EMK dem einfachen linearen Gesetz folgt, man muß daher in erster Linie danach streben, daß ihr Mittelwert während der Kommutierung gleich Null ist und daß sie zu keiner Zeit beträchtliche Werte erreicht. Dies läßt sich in hohem Maße durch Kompensationswicklungen (384) und Wendepole (385) erreichen.

Setzt man die EMK gleich Null, so darf sich der gesamte durch eine kurzgeschlossene Spule tretende Induktionsfluß nicht ändern, wenn sie nacheinander die Lage der benachbarten kurzgeschlossenen Spulen einnimmt. Mithin dürfen — Gleichheit der magnetischen Verhältnisse an beiden Spulenseiten vorausgesetzt — die Spulenseiten keinen Induktionsfluß schneiden; es darf also an den Stellen, wo sich jene Spulenseiten befinden, kein Induktionsfluß in den Anker eintreten oder aus ihm austreten. In dem Grenzfalle, daß die Widerstände verschwindend gering sind, muß der gesamte Induktionsfluß in den Zähnen der Kommutierungszone verschwinden (vgl. Menges, ETZ 1907, S. 1058), nimmt man darauf Rücksicht, daß die Ankerspulen Widerstand besitzen, so muß der Induktionsfluß in den Zähnen, wenn sie die Kommutierungszone durchlaufen, von sehr geringen negativen zu sehr geringen positiven Werten anwachsen.

(392) Die Kommutierungstheorie. Der veränderliche Kurzschlußstrom erzeugt in unmittelbarer Nachbarschaft der Leiter ein veränderliches magnetisches Feld. Um dessen Wirkung aufzuheben, muß von außen ein zweites Feld, das kommutierende Feld, erzeugt werden. Man kann sich die Linien des ersten Feldes im Innern der Nut um die Leiter, aber auch noch im Eisen um die Nut herum in dem einen Sinne, die Linien des zweiten Feldes in den Zähnen entgegengesetzt gerichtet denken. Es bildet sich daher in den Zähnen ein resultierendes Feld aus, dem die magnetische Induktion entspricht. Es ist dabei durchaus nicht ausgeschlossen, daß in demselben Zahne zwischen zwei Leitern die Induktionslinien teils in dem einen, teils in dem anderen Sinne verlaufen. Die übliche Theorie teilt jedoch jedem der beiden Felder einen fiktiven Induktionsfluß zu. Dem ersten Induktionsfluß Φ_s entspricht eine EMK e_s der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion (auch Reaktanzspannung genannt), dem zweiten kommutierenden Induktionsfluß Φ_k die kommutierende EMK e_k. Sind mehrere Spulen gleichzeitig kurzgeschlossen, so folgen die Kurzschlußströme in den verschiedenen Spulen alle genau oder annähernd demselben Gesetze, besitzen aber Phasenverschiebungen gegeneinander. Die EMK e_s widerstrebt der Änderung des Kurzschlußstromes, die kommutierende EMK e_k ist erforderlich, um den Übergang des Stromes i_k von $-I_a$ auf $+I_a$ in der Zeit T des Kurzschlusses zu erzwingen.

Das kommutierende Feld. Die Kurzschlußströme erzeugen demnach für sich ein mitumlaufendes magnetisches Feld, das den mitumlaufenden veränderlichen Induktionsfluß Φ_s zur Folge haben würde, wenn es allein vorhanden wäre. Die Linien dieses Feldes umschlingen die Drähte der betrachteten kurzgeschlossenen Spule. Die zeitliche Änderung von Φ_s erzeugt e_s. Nun ist

$$e_s = L\frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + \Sigma M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t},$$

worin das erste Glied die Wirkung der kurzgeschlossenen Spule auf sich selbst, das zweite Glied die Wirkung der benachbarten kurzgeschlossenen Spulen auf die betrachtete Spule darstellt. Bei linearer Kommutierung ist $\mathrm{d}i_k/\mathrm{d}t = \mathrm{d}i/\mathrm{d}t = \mathrm{const}$, man kann daher $e_s = S.\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ schreiben. Der Mittelwert von e_s ist dann

$$E_{s\,mittel} = \frac{1}{T}\int_0^T S\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t = \frac{S}{T}\int_{-I_a}^{+I_a}\mathrm{d}i = \frac{2SI_a}{T}.$$

Um diese EMK aufzuheben, ist nun eine kommutierende EMK e_k erforderlich, deren Mittelwert während des Kurzschlusses ebenso groß wie e_s und entgegengesetzt gerichtet ist. Diese EMK denkt man sich dadurch erzeugt, daß die Drähte der kurzgeschlossenen Spule die Linien eines feststehenden Induktionsflusses Φ_k schneiden, der von dem kommutierenden Felde herrührt. Das kommutierende Feld muß eine solche Richtung haben, wie sie für die Induktion des Stromes $+I_a$ nach der Kommutierung erforderlich ist. Man hat also

$$e_{k\,mittel} = \frac{2SI_a}{T} = e_s.$$

Die mittlere kommutierende EMK e_k muß also um so größer sein, je stärker der Strom I_a, je größer die Induktivität S der kurzgeschlossenen Spulen und je kleiner die Kurzschlußdauer T ist. Eine Vergrößerung der Bürstenbreite b vergrößert die Kurzschlußdauer T, aber auch die Induktivität. Häufig findet man, daß die Kohlenbürsten etwa drei Teile gleichzeitig bedecken. T wird um so kleiner, je größer die Kommutatorgeschwindigkeit wird. Die Schwierigkeiten der Kommutierung sind daher bei schnellaufenden Maschinen, z. B. bei Turbodynamos, größer als bei langsam laufenden und nur durch Kompensationswicklungen oder Wendepole zu überwinden.

(393) Die Berechnung von S. Die Induktivität S ist von dem magnetischen Widerstande, den der mit der Spule verschlungene Induktionsfluß findet, abhängig und wird daher wesentlich von der Form der Maschine, von der Größe des Luftraumes und von der Höhe der Eisensättigung beeinflußt. Starke Sättigung der Zähne verkleinert die Induktivität der Spule, weil nach (309) die Beiträge zu S von allen Teilen des magnetischen Kreises wegfallen, für die $d\Phi/di$ verschwindet. Es bleibt daher nur der magnetische Pfad durch die Zähne des Ankers, die schwach gesättigt sind, die also zwischen den Polen und in der Nähe der kurzgeschlossenen Spulen liegen, zu berücksichtigen. Liegen außerhalb des Ankers Eisenmassen, z. B. Wendepole, so wird dadurch der magnetische Widerstand verringert, die Induktivität also vergrößert. Zur Erzielung kleiner Induktivität sind glatte Anker günstiger als Nutenanker, flache Nuten günstiger als tiefe und offene günstiger als halb oder ganz geschlossene Nuten. Hat man den von I_a in der Spule selbst und in den übrigen kurzgeschlossenen auf sie einwirkenden Spulen herrührenden sie durchdringenden Induktionsfluß Φ_s berechnet, so ist $SI_a = m\Phi_s \cdot 10^{-8}$ Volt s, wenn m die Windungszahl der Spule bedeutet. S wird also um so kleiner, je weniger Windungen die einzelnen Ankerspulen enthalten, und zwar nimmt es etwa in quadratischem Verhältnis mit m ab, weil man auch Φ_s proportional mit m setzen kann. Es wird also bei gegebener Ankerkonstruktion am kleinsten, wenn man jedes Wicklungselement nur aus einer Windung bestehen läßt, was besonders bei Wechselstrom-Kommutatormotoren üblich ist. Dies ist nur bei der Schleifenwicklung möglich und erfordert vielteilige und große Kommutatoren. Die Gegeninduktivität ΣM ist um so größer, je mehr Spulen gleichzeitig kurzgeschlossen sind. Die benachbarten Spulen wirken umso weniger stark auf die betrachtete Spule ein, je weiter sie von ihr entfernt sind; es kommt also wesentlich darauf an, ob sie in derselben Nut oder in den benachbarten Nuten liegen. Man kann ihre Wirkung im Durchschnitt nach Pichelmayer (ETZ 1901, S. 967) zu 0,4 bis 0,6 der Wirkung der Spule auf sich selbst annehmen. In der Praxis wird vielfach nach einer einfachen empirischen Regel von Parshall und Hobart (Electric Generators S. 159) gerechnet, die im wesentlichen auch Pichelmayer (Dynamobau S. 99 ff.) bestätigt gefunden hat, und die wenigstens für den ersten Entwurf von Maschnen normaler Bauart gute Dienste leistet. Danach findet man die Selbstinduktivität einer Spule, indem man bei 1 A Stromstärke für je 1 cm Länge des ins Eisen gebetteten Ankerdrahtes 4 und für je 1 cm Länge des in der Luft liegenden Ankerdrahtes 0,8 Induktionslinien rechnet. Daraus folgt, daß

$$\Phi_s = m_{ges} I_a (4\,l_E + 0{,}8\,l_L),$$

wenn m_{ges} die Windungszahl aller zu dem Induktionsflusse beitragenden kurzgeschlossenen Windungen, auch solcher, die durch eine andere Bürste kurzgeschlossen sind, l_E die Länge des in das Eisen eingebetteten und l_L die Länge des in der Luft liegenden Drahtes einer Windung in cm bedeutet. Wenn dann die betrachtete Spule m Windungen besitzt, so ist die Induktivität

$$S = \frac{m\,\Phi_s\,10^{-8}}{I_a} = m\,m_{ges}(4\,l_E + 0{,}8\,l_L)\,10^{-8} \text{ Henry.}$$

(394) Kommutierung mit Bürstenverschiebung. Je nach der Art, wie das kommutierende Feld hergestellt wird und beschaffen ist, unterscheidet man verschiedene Arten der Kommutierung. Die älteste Art ist die durch Bürstenverschiebung. Die Bürsten werden so weit aus der neutralen Zone verschoben, bis die kurzgeschlossenen Spulen sich in einem schwachen, von den Polen der Maschine herrührenden Felde befinden. Die Spulenseiten liegen dann in der Nähe der „auflaufenden Polkante". Wächst hier längs der Peripherie des Ankers die Feldstärke zu plötzlich, so ist die Bürsteneinstellung sehr empfindlich. Man gibt daher den Polschuhen gern eine solche Form, daß das Feld allmählich stärker wird, indem man an den Polkanten den magnetischen Widerstand größer macht. Ein einfaches Mittel dazu besteht darin, den Luftspalt nach den Polkanten hin allmählich wachsen zu lassen. Werden die Pole aus Blechen hergestellt, so kann man auch an den Polkanten jedes zweite Blech wegschneiden, so daß infolge der größeren Sättigung der magnetische Widerstand in den Polkanten größer wird. Bei Generatoren müssen die Bürsten in der Drehrichtung des Ankers, bei Motoren, weil sie bei derselben Richtung des magnetischen Feldes und der Ankerströme umgekehrt wie die Generatoren laufen, entgegen der Richtung des Ankers verschoben werden. Das Feld muß ferner umso stärker sein, je stärker der Ankerstrom ist. Da aber das Feld in der Nähe der auflaufenden Polkante um so mehr geschwächt wird, je stärker der Ankerstrom ist, so wird das kommutierende Feld schwächer, wenn es stärker sein müßte. Die Bürsten müssen daher um so weiter verstellt werden, je größer die Belastung wird. In der Regel wird aber verlangt, daß die Maschinen bei jeder Belastung ohne Bürstenverstellung laufen. Man erreicht dies angenähert, indem man die Bürsten für die halbe Belastung richtig einstellt. Bei Leerlauf und bei Vollbelastung ist die Kommutierung dann weniger vollkommen. Die EMK e_s darf dann bei den üblichen Konstruktionen unter Verwendung von Kohlenbürsten nicht mehr als 2 bis höchstens 3 V betragen. Widerstandsverbindungen W zwischen der Wicklung und den Kommutatorteilen und besonders ein nicht zu geringer Übergangswiderstand U von dem Kommutator zu den Bürsten wirken günstig, weil sie bei „zusätzlichen EMKen" ein allzustarkes Anwachsen der „zusätzlichen Ströme" verhindern. Die Übergangswiderstände U sind besonders wirksam, weil sie mit der Größe der Berührungsfläche zwischen einem Kommutatorteile und der Bürste von selbst zu- und abnehmen, während der Widerstand W der Verbindungsleitungen konstant bleibt. Die Übergangswiderstände sollen aber auch nicht zu groß sein, damit nicht zu viel Stromwärme an ihnen auftritt. Die Stromdichte beträgt bei Kohlenbürsten 5—15 A/cm², der Spannungsverlust p an den Übergangsstellen etwa 1,2—1,8 V für eine Bürste. Weiche Kohlen verursachen einen geringeren, harte einen größeren Spannungsverlust. Dickere Kohlen gestatten, den Kommutator kürzer zu bauen, vorausgesetzt, daß die Stromdichte unter ihnen einigermaßen gleichförmig, die Kommutierung also linear ist. Jedoch soll das „kommutierte Bündel", d. h. die Zahl der durch eine Bürste gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulen, bei kleinen Maschinen nicht mehr als 1/6, bei mittleren nicht mehr als 1/12 der auf die Polteilung entfallenden Spulen betragen. Bei großen Maschinen kann man 1/18 erreichen. (Pichelmayer, Dynamobau.) Für das Verhältnis b/β der Bürstenbreite zur Breite eines Kommutatorteiles ist möglichst eine ganze Zahl zu wählen. Häufig findet man bei normalen Maschinen hierfür die Zahl 3.

(395) Kommutierung ohne Bürstenverschiebung. Die Kommutierung ist besonders schwierig, wenn die Maschinen ohne Bürstenverschiebung in beiden Richtungen laufen sollen. Man muß die Bürsten dann in die neutrale Zone stellen. Das kommutierende Feld besteht dann in dem Ankerfelde und hat die verkehrte Richtung. Man ist in diesem Falle auf die reine „Widerstandskommutierung" angewiesen, die in der Zu- und Abnahme der Übergangswiderstände an dem auf- und dem ablaufenden Kommutatorteil begründet ist, und muß die EMK e_s besonders niedrig, etwa zu 1,5 V wählen. In diesem Fall wendet man daher mit Vorteil eine erzwungene Kommutierung unter Anordnung einer Kompensationswicklung (384) oder von Wendepolen (385) an, die vom Ankerstrom oder einem ihm proportionalen Strom durchflossen oder erregt werden. Das Feld dieser Vorrichtungen muß dem des Ankers entgegengesetzt gerichtet sein und es um eine bestimmte Größe übertreffen; zur Abgleichung kann man parallel zur Wicklung einen Regulierwiderstand schalten. Bei Reihenschaltung der Ankerwicklung ist es nicht nötig, überall zwischen je zwei Hauptpolen einen Wendepol anzuordnen; auch ist es nicht nötig, ihnen axial dieselbe Länge wie dem Anker zu geben. Besondere Aufmerksamkeit ist der richtigen Schaltung der Kompensationswicklung und der Wicklung der Wendepole zu schenken. Bei der Anwendung von Wendepolen kann der Magnetismus der Maschinen unter Umständen ins Schwingen kommen (vgl. K. W. Wagner, ETZ 1907, S. 286 ff.).

Wendepole oder Kompensationswicklungen werden auch bei den Schnellläufern, insbesondere bei den Turbodynamos, allgemein angewendet, ferner bei Maschinen mit geschwächter Erregung und solchen für sehr starke Ströme bei niedrigen Spannungen. Die EMK der Induktion e_s kann dann bis zu 15 V und mehr betragen. Beide Anordnungen ermöglichen eine einwandfreie Kommutierung auch unter den schwersten Bedingungen, nämlich Entnahme des vollen Ankerstromes bei schwach oder ganz unerregten Feldmagneten.

(396) Kommutierung bei Wechselstrom. Fließt in den Ankerabteilungen zwischen je zwei Bürsten Wechselstrom, so ist dessen Schwingungsdauer im allgemeinen, jedenfalls bis zu einer Frequenz von 50 Per/s im Vergleich mit der Kurzschlußdauer der Kommutierung so groß, daß man während dieser Dauer den Ankerstrom als konstant ansehen kann. Es ändert sich daher prinzipiell nichts an der Kommutierung. Doch ist zunächst zu beachten, daß bei gleichen effektiven Mittelwerten der Maximalwert der Stromstärke bei Wechselstrom — sinusartiger Verlauf vorausgesetzt — um etwa 41 % höher ist als bei Gleichstrom, so daß hierdurch die Kommutierung schwieriger wird. Außerdem entsteht dadurch, daß das magnetische Hauptfeld wechselt, eine neue EMK, nämlich die der Transformation, in den kurzgeschlossenen Windungen, die man durch geeignete Vorkehrungen unschädlich zu machen sucht. Dies gelingt indessen nur, wenn der Motor läuft. Die neueren Motoren zeigen daher bei normaler Geschwindigkeit kein Feuer an den Bürsten; doch ist es bisher noch nicht gelungen, das Feuer beim Anlauf völlig zu beseitigen. Näheres hierüber siehe (550).

(397) Mechanische Bedingungen für gute Kommutierung. Der Kommutator muß vollkommen rund laufen, die Bürsten müssen mit mäßigem Druck aufliegen und dürfen nicht zittern. Es kommt vor, daß sich das Kupfer der Lamellen stärker abnutzt als die Glimmerzwischenlagen; der Glimmer tritt dann hervor und verhindert die innige Berührung zwischen den Kupferlamellen und den Bürsten. Es tritt daher Feuer auf, das zu einer unzulässigen Erwärmung des Kommutators führt. Harte Kohlen schleifen den Glimmer besser ab als weiche. Es ist ferner nötig, daß die Kommutatorteilung und die Polschuhform mit mathematischer Genauigkeit ausgeführt sind, und der Anker zentrisch läuft. Die Dicke der Isolation zwischen zwei Lamellen soll gegenüber der Breite der Lamellen selbst klein (etwa 0,7—0,9 mm), der Übergangswiderstand zwischen Bürsten und Kommutator auf der ganzen Auflagefläche konstant sein. Die Ankerspulen sollen möglichst gleichartig in die Ankernuten eingebettet sein.



Literatur. Kommutierung, Äquipotialverbindungen, Kohlenbürsten:

1. Aufsätze (in der ETZ u. anderen Zeitschr.) von Arnold, Fischer-Hinnen, Lisca, Menges, Mie, Niethammer, Pichelmayer, Punga, Riebesell, Rothert, Rüdenberg, Sumec.

2. Lehrbücher: Arnold, Die Gleichstrommaschine. — Pichelmayer, Dynamobau (Handbuch d. Elektrotechnik) 1908.

3. Monographien: Kahn, Der Übergangswiderstand der Kohlenbürsten. Voitsche Samml. 1902. — Pohl, Über die Wirkungen der Kurzschlußströme in Gleichstrom-Ankern. Voitsche Samml. 1905. — Punga, Das Funken der Kommutatormotoren. Hannover 1905. — Railing, Über Kommutierungsvorgänge und zusätzliche Bürstenverluste. Voitsche Samml. 1903. — Rüdenberg, Theorie der Kommutation der Gleichstrommaschinen. Voitsche Samml. 1907 (ausführlicher Literaturnachweis). — Waldmann, Beiträge zum Kommutierungsproblem. Diss. München 1907.

Wendepole und Kompensationswicklungen.

Aufsätze (in der ETZ und andern Zeitschr.) von Arnold, Breslauer, Dettmar, Eichberg, Jonas, Menges, Oelschläger, Pelikan, Pfiffner, Pohl, Richter, Rothert, Schulz, Siebert. — Monographie von Rüdenberg, Theorie der Kommutation der Gleichstrommaschinen. Voitsche Samml. 1907.

Wirkungsgrad. Entwurf.

(398) Verluste und Wirkungsgrad. Beim Betrieb einer Dynamomaschine entstehen folgende Verluste:

A. Reibungsverluste.
 1. durch Lagerreibung[1]),
 2. durch Luftreibung und beabsichtigte Ventilation,
 3. durch Reibung der Bürsten auf dem Kommutator oder den Schleifringen, vgl. (374).
 4. durch schnelle Schwingungen.

B. Verluste in den Feldmagneten.
 5. durch Wirbelströme im Eisen der Polschuhe,
 6. durch Stromwärme in der Kupferwicklung,
 7. durch Stromwärme im Regulierwiderstand.

C. Verluste im Anker.
 8. durch Hysterese und Wirbelströme im Ankereisen,
 9. durch Stromwärme des Nutzstromes,
 10. durch Stromverdrängung[2]) in der Kupferwicklung.

D. Verluste an den Stromabnahmestellen.
 11. durch den Übergangswiderstand zwischen den Bürsten und dem Kommutator oder den Schleifringen,
 12. durch Stromwärme des Nutzstromes,
 13. durch Wirbelströme in den Lamellen.

Die unter A. genannten Verluste sind von der Belastung der Maschine wenig abhängig, ebenso bei konstanter Spannung die unter B. genannten; will man daher auch bei geringer Last guten Wirkungsgrad erzielen, so hat man diese Verluste auf ein Mindestmaß herabzudrücken. Dies ist namentlich für Dauerbetriebe mit geringer oder schwankender Belastung wichtig. Bei aussetzenden Betrieben kommt es meist mehr auf Billigkeit und geringes Trägheitsmoment der Maschinen an; dabei sind größere „Leerlaufverluste" zulässig.

---

[1]) Tower, Zeitschr. d. V. D. I. 1885, S. 839. — Dettmar, ETZ 1899, S. 380. — Stribeck, Zeitschr. d. V. D. I. 1902, S. 1341. — Lasche, Zeitschr. d. V. D. I. 1902, S. 1881.

[2]) Literatur: Field, Proc. Am. Inst. El. Eng. 1905, S. 659; ETZ 1905, S. 1038. — Sommerfeld, Ann. d. Physik, 1904, Bd. 15, S. 673. — Emde, El. u. M. 1908, S. 703. — Rogowski, Arch. El. Bd. 2, S. 81, 703. — Richter, Arch. El. Bd. 2, S. 518; Bd. 3, S. 175; Bd. 4, S. 1; Bd. 5, S. 1, 335. — Hillebrand, Arch. El. Bd. 3, S. 111. — Dreyfus, El. u. Maschb. 1914, S. 281; Arch. El. Bd. 3, S. 273; Bd. 4, S. 42. — Niethammer, El. u. Maschb. 1916, S. 113; 1917, S. 17. — Fischer-Hinnen, Bull. Schw. El. Ver. 1917, S. 101; ETZ 1917, S. 488. — Rickli, El. u. Maschb. 1917, S. 249.

Der Reibungskoeffizient ist nach Dettmar proportional mit der Quadratwurzel aus der Umfangsgeschwindigkeit, umgekehrt proportional mit dem Druck, wenn dieser kleiner als etwa 40 kg/cm² ist, und mit der Temperatur des Zapfens.

Die Verluste durch Hysterese und Wirbelströme im Anker wachsen mit der Belastung, weil die Ankerrückwirkung die maximale magnetische Induktion in den Zähnen vergrößert, vgl. Abb. 183, (381). Es entstehen daher bei Belastung zusätzliche Verluste. Bei konstanter Spannung sind die zusätzlichen Verluste im Motor geringer als im Generator, weil die EMK im Motor um den Spannungsverlust geringer, im Generator größer wird als die Spannung.

Stromverdrängung. Bei ungleichförmiger Verteilung des Stromes über den Leiterquerschnitt ist die Stromwärmeleistung größer als bei gleichförmiger Verteilung. Bei großen Querschnitten können dadurch sehr bedeutende zusätzliche Verluste entstehen. Wenn die Wicklung in Nuten untergebracht ist, sind die Verluste durch Stromverdrängung geringer, als wenn sie auf einem glatten Anker liegt. Bei starker Zahnsättigung ist aber auch in den Nuten ein nicht unbeträchtliches magnetisches Feld vorhanden, durch das Stromverdrängung entsteht. Mittel zur Verhütung sind Wahl geeigneter Nutenabmessungen, Anwendung von Kupferlitze anstatt massiver Leiter und Verschränkung der Einzelleiter innerhalb der Nut, z. B. durch Verschränkung zweier paralleler Litzen im Wickelkopf.

Mit Hilfe der Verlustbestimmung ergibt sich die Bilanz der Dynamomaschine

$$\text{Verbrauch} = \text{Leistung} + \text{Verluste}$$

und der Wirkungsgrad für irgend einen Arbeitszustand

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{wiedergewonnene Leistung}}{\text{aufgewendete Leistung}}$$

wobei natürlich Zähler und Nenner in demselben Maß, z. B. beide in kW, auszudrücken sind.

Der Wirkungsgrad bezieht sich nach der Definition auf die Leistung, d. h. auf einen momentanen Arbeitszustand; im Betrieb interessiert oft mehr das Verhältnis des in einer bestimmten Zeit eingetretenen Arbeitsverbrauches in kWh zu der in der gleichen Zeit abgegebenen Arbeit in kWh. Vgl. hierüber (335).

Der Wirkungsgrad ist bei großen Maschinen höher als bei kleinen, bei großer Umfangsgeschwindigkeit höher als bei geringer; bei ganz kleinen Maschinen von etwa 0,1 kW beträgt er etwa 60%, bei ganz großen bis zu 94%. Weitere Anhaltspunkte für mittelgroße Gleichstrommaschinen gibt folgende Tabelle:

Leistung in kW	Umdrehungen in der Minute			
	1800	1200	600	300
1	76	74	70	64
5	82	81	79	68
10	86	85	84	80
50	89	89	89	87
100	91	91	91	90

(399) Entwurf der Maschinen [1]). Die Leistung der Maschinen kann angenähert aus der Formel

$$N = C \cdot d^2 l n \cdot 10^{-6}\,\text{kW} \qquad (1)$$

bestimmt werden, worin C einen Faktor, d den Durchmesser in cm, l die „wirksame Länge" des Ankers, d. h. die Länge des Eisenblechkernes nach Abzug der

[1]) Závada, Die Leistungskonstante elektr. Masch. E. u. M. 1916. S. 125. — Behn-Eschenburg, Charak. u. mech. Eigenschaften mod. Generat. ETZ 1912, S. 592.

von den Lüftungsschlitzen beanspruchten Teile in cm, n die Drehzahl in U/min bedeutet. Die Formel geht aus der Überlegung hervor, daß die Leistung der wirksamen Oberfläche und der Umfangsgeschwindigkeit des Ankers proportional gesetzt werden kann. C heißt der Ausnutzungsgrad, er liegt bei Kupferwicklung im allgemeinen zwischen 1 und 4, bei sehr kleinen Maschinen unter 1 kW sowie bei geringer Lüftung unter 1 und erreicht bei sehr großen Werte bis 6,5. Er ist um so höher, je größer die Leistung, je stärker die Lüftung und im Zusammenhange damit, je geringer das Verhältnis der Länge des Ankers zu seinem Durchmesser, ferner je größer die zugelassene Ankerrückwirkung und je besser die Kommutierung ist. Mittlere Zahlen für C sind bei Kupferwicklung 1,5, wenn l/d groß ist, bis 2,5, wenn l/d klein ist. Bei mittelgroßen Turbodynamos ($d \approx l$) liegt C zwischen 1,25 und 1,75, bei Drehstromturbodynamos findet man Werte bis 2,5. Bei Aluminium, dessen Widerstand etwa das $\sqrt{3}$-fache von dem des Kupfers ist, verringert sich der Ausnutzungsgrad bei gleichem Wickelraum und gleicher Stromwärmeleistung, vgl. (303), im Verhältnis $1:\sqrt{1/\sqrt{3}} = 1:0,76$. Da dann aber auch die Ankerrückwirkung zurückgeht und die Kommutierung günstiger wird, kann man die Leistung darüber hinaus bis auf etwa 0,85 von der bei Kupferwicklung steigern. Die linearen Abmessungen der Aluminiummaschinen sind um etwa 6 Hundertstel größer zu wählen, die Maschinen werden daher etwas schwerer.

Man kann auch den Strombelag B einführen. Er ist bei Gleichstrom

$$B = \frac{z_{ges} I_a}{\pi d} \, \frac{\text{Amp.-Stäbe}}{\text{cm}} = \frac{z_{ges} I_a}{10 \pi d} \, CGS,$$

worin z_{ges} die gesamte Zahl der Ankerdrähte auf dem Anker, I_a die in ihnen fließende Stromstärke in A ist. Die aus Drehmoment D und Winkelgeschwindigkeit $w = 2\pi n/60$ berechnete Leistung ist dann

$$N = wD = \frac{2\pi n}{60} \cdot 2p\beta \frac{B}{10} \cdot \mathfrak{B} l \cdot \frac{d}{2} = \frac{2\pi}{60} p\beta B \mathfrak{B} l d n 10^{-1} \text{Erg/s},$$

worin p die Zahl der Polpaare, β den Polschuhbogen in cm bedeutet, D in Dyn cm und B in Amp.-Stäben/cm gemessen wird. Man kann β etwa gleich zwei Drittel der Polteilung $\tau = \pi d/2p$ setzen und erhält damit

$$N = \frac{2\pi^2}{3 \cdot 60} B \mathfrak{B} \cdot d^2 l n \cdot 10^{-11} \text{ Kilowatt} = 1,1 \, B\mathfrak{B} \cdot d^2 l n \cdot 10^{-12} \text{ Kilowatt.} \quad (2)$$

Der Vergleich von (1) mit (2) ergibt

$$C = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot B \mathfrak{B}, \quad \text{oder} \quad B = 9,1 \cdot 10^5 \cdot C/\mathfrak{B}.$$

Bei Drehstrommaschinen ergibt dieselbe Überlegung einen um 5% geringeren Wert für B. Man kann also rund $B = 9 \cdot 10^5 \, C/\mathfrak{B}$ annehmen.

Der Strombelag liegt demnach bei Kupferwicklung zwischen 113 und 450 A-Stäben/cm, wenn man $\mathfrak{B} = 8000$ Gauß annimmt. Bei Turbodynamos ist $C \approx 1,5$, $\mathfrak{B}$ aber nur etwa gleich 5000 Gauß, für den Strombelag ergibt sich daraus etwa die Zahl 275. Bei Aluminiumwicklung ist der Strombelag um etwa 15 Hundertstel geringer als bei Kupferwicklung.

Ist die Leistung gegeben, so hat man daher noch zwischen Durchmesser, Länge und Drehzahl abzuwägen. In vielen Fällen wird auch die Drehzahl vorgeschrieben sein. Eine Maschine von gegebener Leistung muß bei direkter Kupplung mit einer Kolbenmaschine langsam, bei direkter Kupplung mit einer Dampfturbine sehr schnell laufen, während man bei Riemen- und Seilantrieb eine mittlere Drehzahl wählen wird. Je höher die Drehzahl gewählt wird, um so kleiner fallen die Abmessungen der Maschine aus, allerdings nur solange, wie die Stromabnahme nicht besonders große Abmessungen des Kommutators bedingt. Die wirksame Ankerlänge l wird am besten so gewählt, daß der Querschnitt der Feldmagnete etwa quadratisch oder kreisförmig wird.

(400) Umfangsgeschwindigkeit. Der Anker normaler Maschinen besitzt eine Umfangsgeschwindigkeit von 10—30 m/s. Bei ganz kleinen Maschinen (unter 1 kW) und bei sehr langsam laufenden großen liegt die Umfangsgeschwindigkeit unter 10, bei Gleichstrommaschinen ohne Wendepole zwischen 12 und 18 m/s. Bei Wechselstrommaschinen fällt im allgemeinen die Rücksicht auf die Kommutierung weg, ihre mittlere Geschwindigkeit liegt daher höher, nämlich zwischen 15 und 30 m/s.

Als Schnelläufer kommen besonders Maschinen für große Leistungen von etwa 500—10 000 kW und Drehzahlen von 3000 bis 300 in Betracht. Die größte Leistung einer einzigen Maschine ist zurzeit etwa 50 000 kW. Die Umfangsgeschwindigkeit des Läufers beträgt 30—120 m/s, bei Wechselstrom liegt sie wieder höher als bei Gleichstrom. Häufig findet man 60—80 m/s. Mit Rücksicht auf die Fliehkraft sind Eisenkörper und Wicklung des Läufers besonders sorgfältig zu konstruieren. Die Maschinen erhalten eine bedeutende Länge, daher ist die Lüftung und die Abkühlung erschwert. Gleichstromturbomaschinen werden nur mit Wendepolen oder Kompensationswicklung oder mit beiden zugleich gebaut.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Kommutatoren liegt bei normalen Maschinen ohne Wendepole zwischen 5 und 14 m/s, im Mittel bei 8—9 m/s, bei Bahnmotoren, auch wenn sie Wendepole haben, ebenso hoch, bei normalen Maschinen mit Wendepolen zwischen 15 und 22 m/s, im Mittel bei 17—19 m/s; bei Umformern steigt sie bis zu 30 m/s ohne Wendepole, bei Turbodynamos mit Wendepolen bis zu 35 m/s, bei Wechselstromkommutatormaschinen liegt sie zwischen 8 und 15 m/s.

Schleifringe macht man, wenn keine Kurzschließung vorhanden ist, so klein wie möglich, sonst ist ihr Durchmesser ziemlich beliebig. Bei kleinen Durchmessern beträgt die Umfangsgeschwindigkeit 5 bis 15 m/s. Starke Wellen machen großen Durchmesser nötig, die Geschwindigkeit steigt dann bis auf 35 m/s. Bei Unipolarmaschinen geht man noch höher.

(401) Polzahl und Frequenz. Die Polzahl $2p$ ist bei Wechselstrommaschinen durch die Frequenz und die Drehzahl bestimmt. Bei Synchronmaschinen besteht die Beziehung $p = 60f/n$, wenn f die Frequenz in Per/s ist. Bei Gleichstrom bleibt für die Wahl der Polzahl noch ein gewisser Spielraum, weil für die Ankerströme keine bestimmte Frequenz vorgeschrieben ist; sie wird daher verschieden ausfallen je nach der Polzahl der Maschine. Bei Wahl einer zu geringen Polzahl wird die Maschine schwer (schweres Joch), die Ankerrückwirkung groß und die Kommutierung schwierig. Wechselstrommaschinen werden bei 25 Per/s schwerer als bei 50 Per/s. Bei Gleichstrommaschinen ist zu beachten, daß, je größer die Polzahl, um so höher auch die Frequenz ist, und um so größer die Eisenverluste in den Zähnen werden. Bei Wahl einer größeren Zahl von Polen ist darauf zu sehen, daß der Abstand der Bürstenbolzen voneinander und die Zahl der Kommutatorteile nicht zu klein werden. Die neuere Praxis arbeitet mit größeren Polzahlen, als es früher üblich war; man wählt bei den üblichen Drehzahlen vierpolige Maschinen bereits bei Leistungen von etwa 5 kW, sechspolige bei etwa 20 kW usw. Sehr schnell laufende Maschinen für große Leistungen (Turbogeneratoren) werden mit einer geringen Zahl Pole ausgeführt.

Die Frequenz der Ankerströme von Gleichstrommaschinen kann, wenn nicht besondere Verhältnisse vorliegen, etwa zu 25 Per/s angenommen werden, sie schwankt aber in weiten Grenzen, etwa zwischen 10 und 80 Per/s. In einer Typenreihe muß bei fortschreitenden Größen entweder in den Drehzahlen oder in den Frequenzen ein Sprung eintreten.

(402) Magnetische Induktion. Die Ankerzähne werden so bemessen, daß in den jeweilig unter den Polen stehenden Zähnen eine magnetische Induktion von 20 bis 24 000 Gauß entsteht. In der Luft beträgt die Induktion dann je nach dem Verhältnisse von Zahnbreite zu Nutenbreite etwa 8 bis 9000 Gauß. In den

Feldmagneten geht man bei Schmiedeeisen und Stahlguß unter Berücksichtigung der Streuung nicht über 14 000 bis 16 000 Gauß, während endlich Gußeisen im allgemeinen mit höchstens 8 bis 9000 Gauß belastet wird.

Turbodynamos haben etwa 5000 Gauß im Luftspalt, Gleichstromturbodynamos erhalten daher Fremderregung, vgl. (415). Der Anker der Erregermaschine sitzt in der Regel unmittelbar auf der verlängerten Welle der Hauptmaschine.

Da Gleichstrommaschinen in der Regel als Außenpolmaschinen ausgeführt werden, so ergibt sich bei kleinen Ankerdurchmessern eine beträchtliche Abnahme des Zahnquerschnittes nach dem Kranz zu. Man muß dann, da die Induktion meist sehr hoch ist, bei der Berechnung der Durchflutung der Veränderlichkeit des Querschnittes Rechnung tragen, was am besten durch Zerlegung der Zähne in Schichten und Bestimmung der mittleren Dichte für jede Schicht geschehen kann.

Sobald die Induktion in den Zähnen über 20 000 getrieben wird, kann der Teil des Induktionsflusses, der durch die Nuten und Ventilationsschlitze geht, nicht mehr vernachlässigt werden.

(403) Spannungen. Normale Spannungen für Gleichstromanlagen sind 110, 220, 440, 550, 750, 1100, 1500, 2200, 3000 V. Über 3000 V sind Gleichstrommaschinen selten gebaut worden, vereinzelt für 5, 10 und sogar 20 kV. Vgl. Linke, ETZ 1915, S. 549.

Normale Spannungen für Drehstromanlagen sind 220, 380, 6000, 15 000, 35 000, 60 000, 100 000 V. Die Spannungen der Maschinen und Transformatoren liegen — unter normalen Verhältnissen bis zu 10% — höher. Vergl. Entwurf ETZ 1919, S. 457.

Man wählt bei Anlagen mit Primärtransformatoren die Spannung der Generatoren möglichst so, daß man Stabwicklung anwenden kann. Dies führt bei großen Maschinen zu Spannungen von 5 bis 8 kV.

(404) Normalform der Dynamomaschine. Als Normalform ist die Form anzusehen, bei der die Polschäfte kreisrunden oder quadratischen Querschnitt und daher auch die Polschuhe angenähert quadratischen Querschnitt besitzen. Es wird dann die Polschuhbreite β gleich der Ankerlänge l und aus

$$l = \beta \approx \frac{2}{3}\,\frac{\pi d}{2p} \quad \text{erhält man} \quad l \approx \frac{d}{p}\,.$$

Führt man diesen Wert für l in (399) Gl. (1) ein, und ersetzt man d und n aus den Gleichungen $f = pn/60$ und $v = \pi d n/60$, so erhält man

$$N \doteq C \cdot \frac{60 \cdot v^3}{\pi^3 f^2}\, p \approx 2C \frac{v^3}{f^2}\, p \text{ Kilowatt}, \quad (v \text{ in m/s}),$$

woraus

$$p = \frac{1}{2C}\,\frac{N f^2}{v^3}$$

folgt. Hieraus kann man die Polpaarzahl der Gleichstrommaschine angenähert bestimmen. Setzt man z. B. $C = 1$, $f = 25$ Per/s, $v = 10$ m/s, $p = 1$, so ergibt sich $N = 3{,}2$ kW. Über diese Leistung hinaus werden meistens schon vier Pole ($p = 2$) gewählt. Ist bei der Umfangsgeschwindigkeit, bis zu der man gehen will, die vorgeschriebene Leistung mit der Normalform nicht zu erreichen, so muß man zu größeren Ankerlängen schreiten. Häufig führt man bei einer Typenreihe mit Rücksicht auf die Fabrikation die Maschinen mit mehreren Ankerlängen bei gleichem Durchmesser aus, um an Blechschnitten und Modellen für die Gußteile zu sparen.

(405) Lüftung. Besonders bei großen, schnell laufenden Maschinen werden häufig Ventilatoren eingebaut, die die Kühlluft auf genau vorgeschriebenen Wegen durch die Maschine treiben (vgl. Abb. 312, S. 377). Sie sind besonders dann erforderlich, wenn die Luft parallel zur Achse der Maschine durch Anker und Feldmagnete strömen soll. Die Luft wird meistens durch Luftfilter gereinigt,

bevor sie in die Maschine eintritt. Die warme Luft kann im Winter zur Heizung des Maschinenraumes dienen, während sie im Sommer am besten durch einen besonderen Kanal ins Freie geführt wird. (Über Luftfilter vgl. ETZ 1914, S. 533, Prospekte d. Deutschen Luftfilter-Baugesellschaft m. b. H. Berlin und Dr. F. Raschig, Ludwigshafen a. Rh.)

Gleichstromdynamos.

Stromerzeuger.

(406) Unipolarmaschinen (W. Siemens)[1]. Vollkommenen Gleichstrom liefern die Unipolarmaschinen. Dies sind Maschinen, bei denen sich die Stromleiter dauernd in einem homogenen Felde, gleichsam nur der Wirkung eines Poles ausgesetzt, bewegen (96,3). Damit hierbei Ströme auftreten können, müssen Anfang und Ende jedes Leiters an Schleifringe angeschlossen sein; denn es tritt nur dann eine Änderung des den gesamten Stromkreis durchsetzenden Induktionsflusses ein, wenn ein Teil des Stromkreises fest, der andere beweglich ist. Eine dauernde Bewegung eines Teiles des Stromkreises ist aber nur bei Verwendung von Schleifringen möglich. Aus demselben Grunde ist eine Hintereinanderschaltung der Stromleiter nur durch Vermittlung von Schleifringen möglich (Kirchhoff). Jede Unipolarmaschine muß daher mindestens zwei Schleifringe haben. Zwischen diesen können beliebig viele, gleichmäßig über die Peripherie eines Eisenzylinders verteilte, stabförmige Leiter oder auch ein Kupferzylinder geschaltet werden.

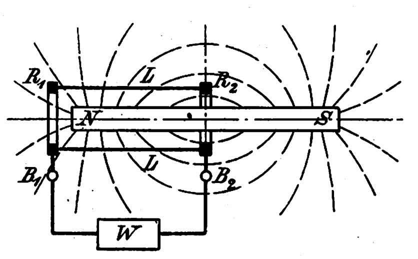


Abb. 192. Unipolare Induktion.

Abb. 192 zeigt die einfachste Anordnung einer solchen Maschine. Konzentrisch zu dem ruhenden Stabmagnet NS sind zwei Schleifringe $R_1 R_2$, der eine am Ende, der andere um die Mitte des Magnets angebracht. Die Ringe sind durch die Leiter LL miteinander verbunden. Sie bilden den beweglichen, der äußere Stromkreis $B_1 W B_2$ den ruhenden Teil des ganzen Stromkreises.

Solche Maschinen sind bei Anwendung einer genügenden Anzahl Bürsten für sehr starke Ströme bei niedrigen Spannungen geeignet. Sollen mehrere Gruppen von Leitern, die untereinander parallel geschaltet sind, hintereinander geschaltet werden, so ist für jede Gruppe ein Paar Schleifringe erforderlich. Bei hohen Drehzahlen sind solche Maschinen auch zur Erzeugung höherer Spannungen geeignet. So hat die Gen. El. Co. nach dem Entwurf von Noeggerath Turbodynamos von 50 bis 5000 kW bei Spannungen von 6 bis 600 V, Stromstärken von 800 bis 8000 A und Geschwindigkeiten von 900 bis 3000 U/min gebaut, und zwar die Maschinen für höhere Spannungen mit 12 Paar Schleifringen aus Bronze oder Stahl, die mit Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 45 m/s laufen. Die Bürsten bestehen aus dünnen Metallblättern und werden mit Graphit geschmiert. Die Anordnung ist schematisch durch Abb. 193 dargestellt (vgl. auch El. Bahn. u. Betr. 1905, S. 233 und ETZ 1905, S. 831). Bei $A A$ sind Öffnungen zur Anordnung der Bürsten und zur Herausführung der Zu- und Ableitungen zu der festen Wicklung B vorgesehen. Die Maschine wird durch zwei konzentrisch zur Welle gelagerte Spulen SS so erregt, daß der Induktionsfluß auf der ganzen zylindrischen Ober-

[1]) Ugrimoff, Die unipolare Gleichstrommaschine. Diss. Karlsruhe 1910. — Feldmann — Azyklische Maschine von Noeggerath, ETZ 1905, S. 807; ETZ 1914, S. 718; Journ. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 804.

fläche des Läufers dieselbe radiale Richtung und Dichte besitzt. Die Wicklung besteht aus Flachkupferstäben auf der Oberfläche des Läufers, die in regelmäßiger Verteilung an die Schleifringe angeschlossen sind, nämlich Stab 1 an Schleifringe I, I, Stab 2 an Schleifringe II, II, Stab 3 an Schleifringe III, III usw., so daß die Anschlüsse eine Spirale mit einem Umgang bilden. Auch die Verteilungder Bürsten ist wichtig, da die starken Ströme, die in den Schleifringen fließen, beträchtliche magnetische Felder erzeugen.

Der Wirkungsgrad und die Ankerrückwirkung sind annähernd ebenso groß wie bei Kommutatormaschinen. Der Vorzug der Unipolarmaschinen besteht in ihrer einfachen Konstruktion, ihr Nachteil in der großen Reibung und der starken Abnutzung der Bürsten.

(407) Kommutatormaschinen. Die übliche Ankerwicklung ist die geschlossene Wicklung mit Kommutator. Bei einem konstanten, sonst aber beliebigen Felde unter den Polen ist die Summe der EMKe in den Drähten, die sich unter den Polen befinden, wesentlich konstant. Schwankungen der EMK werden daher besonders durch die Drähte oder bei Nutenankern durch die Zähne hervorgerufen, die in den Bereich der Pole eintreten oder aus ihm austreten. Sie werden daher um so geringer sein, je mehr Drähte unter den Polen liegen, und je weniger Windungen eine Spule enthält. Um bei Nutenankern die Konstanz des Feldes zu sichern, vermeide man Nutenzahlen, die durch die Polzahl teilbar sind.

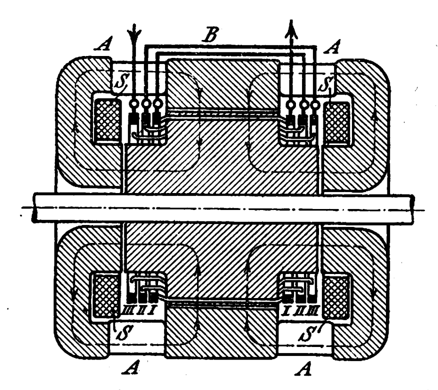


Abb. 193. Unipolarmaschine.

(408) Die EMK. Jeder Leiter, der sich durch das Feld unter den Polen hindurchbewegt, ist Sitz einer EMK e, die der Induktion $\mathfrak{B}$, der Umfangsgeschwindigkeit v in cm/s und der Länge l des Leiters in cm proportional ist. Es ist also

$$e = \mathfrak{B} v l \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \tag{1}$$

Da gleichzeitig bei einer zweipoligen Maschine $\beta z/2\pi$ Drähte unter einem Pole liegen, worin β den Polschuhwinkel (in Bogenmaß ausgedrückt) und z die Stabzahl für zwei Pole bedeutet, so erhält man für die gesamte EMK zwischen zwei Bürsten bei Schleifenwicklung

$$E = \frac{\beta}{2\pi} z \cdot \mathfrak{B} v l \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \tag{2}$$

Da nun $v = 2\pi r n/60$ und $\beta r l \mathfrak{B} = \Phi$, so wird

$$E = \frac{n}{60} z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \tag{3}$$

Diese Formel gilt für eine zweipolige Maschine. Bei mehrpoligen Maschinen findet man in gleicher Weise

$$E = \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot z_{ges} \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt,} \tag{4}$$

worin p die Polpaarzahl, $2a$ die Zahl der parallel geschalteten Ankerzweige (vgl. 368) und z_{ges} die gesamte Stabzahl bedeutet. Die EMK ist unabhängig von der Ver-

teilung des Induktionsflusses über die Polfläche. Schwankungen in der Höhe der EMK entstehen dadurch, daß bald mehr, bald weniger Stäbe unter einem Pole liegen, ferner dann, wenn sich infolge der Nutung der Widerstand des magnetischen Kreises periodisch ändert. Zur Abhilfe vergrößert man den Abstand zwischen Polfläche und Ankerfläche allmählich nach den Polkanten hin oder stellt die Polkanten oder die Nuten schräg mit einer Steigung gleich der Nutenteilung auf die Ankerlänge.

Bei Belastung der Maschine sinkt die EMK etwas, weil die Ankerrückwirkung das Feld schwächt, besonders wenn die Bürsten aus der neutralen Zone verdreht sind.

Die Spannung P_a des Ankers zwischen den Bürsten ist um den Spannungsverlust $I_a R_a$ kleiner als die EMK entsprechend der Gleichung

$$P_a = E - I_a R_a. \tag{5}$$

(409) Das Drehmoment. Aus der Gleichung $9{,}81 \cdot D w = E I_a$, worin das Drehmoment D in kg*m, E in Volt, I_a in Amp. auszudrücken ist, ergibt sich mit Gl. (4) aus (408)

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{10^{-8}}{9{,}81} \cdot \frac{p}{a} z_{ges} \Phi I_a \text{ kg*m}. \tag{6}$$

Man kann die drei Gleichungen (5), (4) und (6), die für Generatoren und Motoren gültig sind, vereinfacht folgendermaßen schreiben

$$\left.\begin{aligned} E &= P + RI \\ E &= c_1 \Phi n \\ D &= c_2 \Phi I_a \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

(410) Schaltungen der Maschinen. Man unterscheidet selbsterregende und fremderregte Maschinen. Bei den selbsterregenden Maschinen wird entweder die volle Ankerstromstärke oder ein Teil von ihr oder eine Kombination der ganzen Ankerstromstärke und eines Teils davon für die Erregung der Feldmagnete nutzbar gemacht. Demnach sind drei Schaltungen möglich.

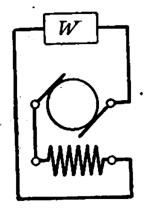


Abb. 194. Reihenschlußschaltung.

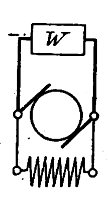


Abb. 195. Nebenschlußschaltung.

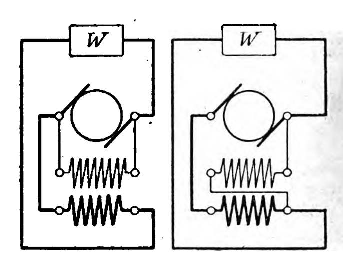


Abb. 196. Abb. 197. Doppelschlußschaltung.

Bei der Reihenschlußmaschine (auch Hauptschluß-, Hauptstrom-, Serienmaschine, Maschine mit direkter Wicklung genannt) durchfließt der ganze Ankerstrom die Feldmagnetwicklung, Abb. 194. Da die Durchflutung eine bestimmte Größe haben muß, so erhält die Erregerwicklung in diesem Falle wenig Windungen, und zwar mit Rücksicht auf Leistungs- und Spannungsverlust (etwa 2—5%) von starkem Querschnitt.

Bei der Nebenschlußmaschine (Abb. 195) liegt die Erregerwicklung unmittelbar zwischen den Ankerbürsten. Die Wicklung erhält jetzt die volle Ankerspannung und muß daher, und zwar wiederum mit Rücksicht auf den Leistungsverlust, einen entsprechend großen Widerstand besitzen, was durch die

Wahl vieler Windungen verhältnismäßig dünnen Drahtes erreicht wird. In diesem Falle beträgt die Stromstärke wenige Hundertstel der Ankerstromstärke.

Bei der Doppelschlußmaschine (auch Kompoundmaschine oder Maschine mit gemischter Wicklung genannt) sind beide Schaltungen vereinigt, Abb. 196 u. 197; es überwiegt hierbei in der Regel der Einfluß der Nebenschlußwicklung. Man kann zwei Anordnungen unterscheiden. Die Nebenschlußwicklung liegt entweder direkt zwischen den Ankerbürsten, Abb. 196, oder zwischen der einen Ankerbürste und der freien Klemme der Reihenschlußwicklung, Abb. 197. Die Doppelschlußmaschine ist nur wenig im Gebrauch.

(411) **Das Angehen der Maschine** erfolgt nach dem dynamoelektrischen Prinzip von Werner Siemens mit Hilfe des remanenten Magnetismus. Bei der Reihenschlußmaschine muß dazu der äußere Stromkreis geschlossen sein, damit ein Strom in der Erregerwicklung auftreten kann. Ferner muß die Erregerwicklung so geschaltet sein, daß der entstehende Strom den remanenten Magnetismus verstärkt. Spricht daher eine Reihenschlußmaschine auch bei richtiger Drehzahl nicht an, so kann der Grund in einem zu großen Widerstand des Stromkreises — Abhilfe: Verringerung des äußeren Widerstandes oder völliges Kurzschließen —, in einer falschen Schaltung der Erregerwicklung — Abhilfe: Vertauschen der Anschlüsse — oder in einem zu geringen remanenten Magnetismus — Abhilfe: Erregung von einer besonderen Stromquelle aus während einiger Sekunden — liegen.

Die Nebenschlußmaschine spricht am besten an, wenn der äußere Stromkreis offen und der Nebenschluß-Regulierwiderstand kurz geschlossen ist. Im übrigen gelten dieselben Bedingungen für das Angehen wie bei der Reihenschlußmaschine. Bei schnellem Abstellen der Maschine oder bei Kurzschlüssen können die Feldmagnete umpolarisiert werden, so daß nun beim Wiederanlassen die im Anker induzierte EMK und der Strom entgegengesetzt gerichtet sind. Falsche Stromrichtung ist für Bogenlicht, Parallelbetrieb mit anderen Maschinen und mit Akkumulatoren und für chemische Betriebe unzulässig; es muß daher durch Fremderregung während kurzer Zeit Abhilfe geschaffen werden. Der Grund dieser Erscheinung liegt im Überwiegen der Anker-MMK über den zu geringen remanenten Magnetismus.

Es muß im übrigen auf richtige Bürstenstellung geachtet werden, die je nach der Art der Verbindung der Ankerdrähte mit dem Kommutator verschieden sein kann. Die richtige Stellung wird von der Fabrik durch irgend eine Marke bezeichnet, auf die zu achten ist.

Bei den modernen Maschinen sind in der Regel die Stirnverbindungen so hergestellt, daß die Kommutatorteile, an die eine Ankerspule angeschlossen ist, zu beiden Seiten an der Mittellinie dieser Spule liegen. In diesem Falle müssen die Bürsten vor der Mitte der Pole stehen.

(412) **Charakteristiken der Maschinen.** Charakteristiken werden bestimmte Kurven in einem rechtwinkligen Koordinatensystem genannt, die über das Verhalten der Maschinen Aufschluß geben. Die Geschwindigkeit wird dabei überall als konstant angenommen.

Die magnetische Charakteristik (Abb. 198) zeigt die Abhängigkeit der EMK von der Erregung bei Leerlauf. Bei Aufnahme dieser Kurve wird die Maschine fremd erregt. Diese Charakteristik hat die Form der Magnetisierungskurven und liegt etwas tiefer oder höher, je nachdem man sie mit steigenden oder fallenden Werten der Erregung aufnimmt. Sie hat bei allen Arten von Schaltungen dasselbe Aussehen, weil die Maschine fremd erregt ist.

Die Belastungscharakteristik kann man entweder bei Fremderregung, die dann konstant zu halten ist, oder bei Eigenerregung aufnehmen. Als Abszissen wählt man die Ankerstromstärken, als Ordinaten entweder die EMKe — innere Charakteristik — oder die Klemmenspannungen der Maschine — äußere Charakteristik. Die Belastungscharakteristik bei Fremd-

erregung zeigt Abb. 199. Die EMK verläuft anfangs horizontal, fällt jedoch bei größeren Stromstärken infolge der Ankerrückwirkung. Die Klemmenspannung liegt um den Spannungsverlust $I_a R_a$, der durch die annähernd gerade Linie OA dargestellt ist, tiefer als die innere Charakteristik.

Die Charakteristik der Reihenschlußmaschine (Abb. 200) zeigt annähernd die Form der magnetischen Charakteristik, liegt jedoch etwas tiefer und fällt wegen der Ankerrückwirkung nach Überschreitung einer bestimmten Stromstärke wieder. Die Charakteristik der Nebenschlußmaschine

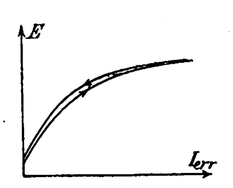


Abb. 198. Magnetische Charakteristik.

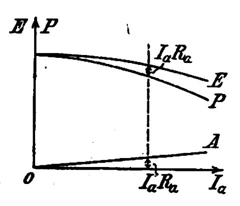


Abb. 199. Belastungscharakteristik bei Fremderregung.

(Abb. 201) fällt erst langsam, mit zunehmender Stromstärke schneller, kehrt bei einem maximalen Wert der Stromstärke um und zur Abszissenachse zurück. Es gehören daher im allgemeinen zu jeder Ankerstromstärke zwei Werte der EMK und der Klemmenspannung, ein größerer und ein kleinerer.

Praktisch benutzt wird bei der Reihenschlußmaschine der Teil oberhalb des Knies, bei der Nebenschlußmaschine der höchste Teil der Kurve, längs dessen die Spannung wenig sinkt. Die Nebenschlußmaschine hat innerhalb dieses Bereiches die Eigenschaft, daß sie unabhängig von der Belastung die Klemmenspannung nahezu konstant hält. Sie ist daher die gegebene Maschine für alle Anlagen, die mit konstanter Spannung arbeiten.

Die Charakteristik der Reihenschlußmaschine schneidet auf der Ordinatenachse, die Charakteristik der Nebenschlußmaschine auf der Abszissenachse eine Strecke ab, die um so größer ist, je stärker der remanente Magnetismus ist.

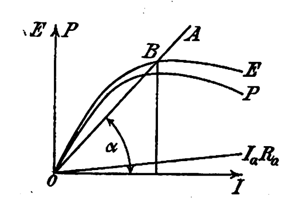


Abb. 200. Charakteristiken der Reihenschlußmaschine.

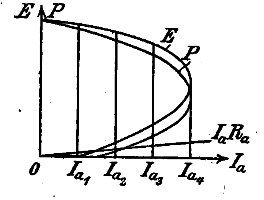


Abb. 201. Charakteristiken der Nebenschlußmaschine.

(413) Der Beharrungszustand der Maschinen ist mit Hilfe der Charakteristik leicht zu finden. Da $I = E/R_{ges}$, so kann bei konstantem R_{ges} die Beziehung zwischen I und E durch eine Gerade OA (Abb. 200) dargestellt werden; OA schneidet die innere Charakteristik der Reihenschlußmaschine in B. Links von B liegt die Charakteristik über der Geraden OA, d. h. die EMK ist größer, als zur Erzeugung der vorhandenen Stromstärke erforderlich ist; rechts von B liegt die Charakteristik unterhalb der Geraden OA, d. h. die EMK ist kleiner, als zur Erzeugung der vorhandenen Stromstärke erforderlich ist. Die Stromstärke muß

daher links von B steigen, rechts von B fallen. Gleichgewicht ist nur im Punkte B vorhanden. Für den Winkel α aber gilt die Beziehung

$$\operatorname{tang} \alpha = c \cdot E/I = c \cdot R_{ges}.$$

Ist der Widerstand des gesamten Stromkreises R_{ges} zu groß, so kann der Fall eintreten, daß α zu groß wird, und OA die Kurve OE nicht schneidet. Dabei ist angenommen, daß die Charakteristik durch O geht, d. h. die Remanenz verschwindend gering ist. Die Maschine kann dann keinen Strom liefern, sie geht nicht an. Fällt die Gerade OA mit dem geradlinig ansteigenden Teil der Charakteristik zusammen, so ist die Stromstärke labil. Ein richtiges Arbeiten der Maschine ist also nur möglich, wenn man hinter dem Knie arbeitet. R_{ges} darf um so größer sein, je größer die Drehzahl ist, und wenn umgekehrt R_{ges} konstant ist, darf die Drehzahl nicht unter einen bestimmten Wert sinken. Diesen Wert nennt man die tote Geschwindigkeit für den betreffenden Widerstand.

Ist der äußere Stromkreis offen, so erregt sich die Nebenschlußmaschine ebenso wie die Hauptschlußmaschine, weil der ganze Ankerstrom durch die Erregerwicklung fießt.

Ist die Maschine belastet, so kann man, Abb. 202, eine Schar von Kurven zeichnen, die P über I_{err} bei verschiedenen konstanten Werten der Ankerstromstärke darstellen. Da I_{err} und P_{err} einander proportional sind, so werden die Werte von P_{err} durch die Ordinaten einer durch den Nullpunkt gehenden Geraden OA dargestellt. Bei Selbsterregung muß $P_{err} = P$ sein. Dies trifft für die Schnittpunkte der Geraden mit den P-Kurven zu. Es kann daher im allgemeinen dieselbe Ankerstromstärke I_a für zwei Werte von P eintreten, wobei natürlich der Widerstand des äußeren Kreises verschieden groß sein muß, nämlich

$$R_{a1} = \frac{P_1}{I_{a1}} \text{ und } R_{a2} = \frac{P_2}{I_{a2}}.$$

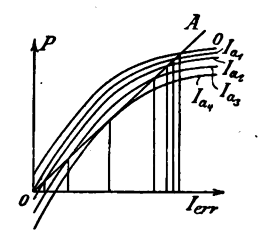


Abb. 202. Magnetische Charakteristiken bei verschiedenen Ankerstromstärken.

Trägt man die Werte der aus Abb. 202 für die verschiedenen Stromstärken I_a entnommenen Spannungen über I_a als Abszissen auf, so erhält man die Belastungscharakteristik Abb. 201.

(414) Die **Doppelschlußwicklung** läßt erreichen, daß die äußere Belastungscharakteristik annähernd horizontal verläuft — die Maschine ist dann „kompoundiert" — oder sogar bei Belastung ansteigt — die Maschine ist dann „überkompoundiert".

(415) Die **Stabilität** der Maschinen ist nach (413) nur vorhanden, wenn man mit starkem Magnetismus oberhalb des Knies arbeitet. Bei kompensierten Maschinen, besonders bei Turbodynamos, ist aber vielfach im Gebiete der Erregung die Charakteristik geradlinig; in diesem Falle muß man mit Fremderregung arbeiten.

(416) Regulierwiderstände für Generatoren. Zur Einstellung der gewünschten Spannung ist bei Nebenschluß- und Doppelschlußmaschinen ein Regulierwiderstand im Nebenschlußkreise erforderlich. Da die Maschinen sich durch den Betrieb erwärmen, und mithin der Widerstand des Nebenschlußkreises mit der Zeit zunimmt, so muß zu Anfang ein größerer Teil des Regulierwiderstandes eingeschaltet sein, der bei zunehmender Erwärmung ausgeschaltet wird. Außerdem aber muß bei Nebenschlußmaschinen die Erregung bei stärkerer Belastung erhöht werden. Es muß also auch in warmem Zustande der Maschine bei Leerlauf ein Teil des Widerstandes eingeschaltet sein. Die Größe des Widerstandes ist daher so zu berechnen, daß bei höchster Temperatur und größter Belastung sicherheitshalber noch etwas Widerstand eingeschaltet bleiben kann, und daß der Widerstand anderseits aus-



reicht, um die Spannung der kalten, leerlaufenden Maschine bis auf den normalen Betrag herunterzubringen. Die einzelnen Stufen der Regulierwiderstände werden vielfach gleich groß gemacht; richtiger ist es, sie so zu bemessen, daß überall dem Abschalten einer Stufe bei konstanter Belastung möglichst die gleiche Spannungserhöhung entspricht. Die Stufenzahl ist so groß zu wählen, daß die Sprünge nicht größer als etwa 1% werden. Vgl. Krause, ETZ 1902, S. 66, 383, 556.

(417) Kurzschlußkontakt. Die Widerstände werden zweckmäßig mit einem besonderen Kontakt versehen, um die Erregerwicklung ohne Spannungserhöhung stromlos zu machen. Die Schaltung ist durch Abb. 203 gegeben. Durch Bewegung der Kurbel im Sinne des Uhrzeigers wird erst der ganze Widerstand vor die Wicklung geschaltet, sodann wird bei Berührung des Kurzschlußkontaktes *C* die Erregerwicklung kurz geschlossen und endlich der äußere Erregerkreis unterbrochen. Die durch das Verschwinden des Magnetismus hervorgerufene EMK kann nun keine hohe Spannung erzeugen, da die Wicklung kurz geschlossen ist. Der durch sie hervorgerufene Strom läuft sich nach einiger Zeit — einigen Sekunden bis 1 Minute — tot, ohne Schaden anzurichten. Der Kurzschlußkontakt muß eine Verriegelung besitzen, damit die Erregung nicht aus Versehen während des Betriebes stromlos gemacht werden kann. Die Verriegelung muß selbsttätig wirken, vorgesteckte Stöpsel sind unzulässig.

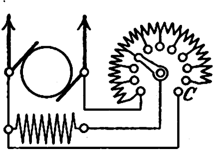


Abb. 203. Nebenschlußregulierwiderstand mit Kurzschlußkontakt.

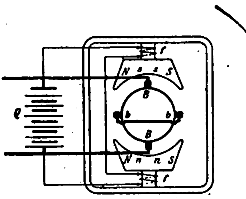


Abb. 204. Querfeldmaschine von Rosenberg.

(418) Querfeldmaschine von Rosenberg. Vgl. ETZ 1905, S. 393; 1907, S. 1207 (Abb. 204). Bringt man bei einer fremderregten Maschine auf dem Kommutator für jedes Polpaar einen zweiten Bürstensatz *BB* an, so daß einmal Bürsten *bb* in der üblichen Stellung und außerdem Bürsten *BB* in der Mitte zwischen den ersteren vorhanden sind, und schließt man die Bürsten *bb* kurz, so erzeugt der im kurzgeschlossenen Kreise fließende Strom ein Querfeld, dem ein starker Induktionsfluß entspricht, weil die Pole sehr große Abmessungen besitzen. Es entsteht daher am Bürstenpaar *BB* eine Spannung. Legt man an diese Bürsten irgend einen Stromkreis, so kann von ihnen Strom abgenommen werden. Dieser eigentliche Nutzstrom erzeugt aber seinerseits ein neues Querfeld, das gegen das erste Querfeld um 90 Grad, gegen das Feld der Feldmagnete also um 180 Grad räumlich verschoben ist und daher den Magnetismus der Feldmagnete schwächt. Der aus dem Felde der Erregerspulen und dem vom Nutzstrome erzeugten Querfelde resultierende Induktionsfluß in senkrechter Richtung darf nur sehr gering sein, weil die Bürsten *bb* kurz geschlossen sind. Die beiden Felder sind daher nahezu entgegengesetzt gleich groß. Die Schenkel sind daher von geringem Querschnitt, die Polschuhe aber groß, damit sich der erste Querfluß gut ausbilden kann. Das Erregerfeld ist nun etwa 10% größer als das Feld des Nutzstromes; folglich kann der Nutzstrom bei konstanter Erregung durch die Spulen *ff* höchstens um 10% steigen, weil dann das resultierende Feld in senkrechter Richtung zu Null wird. Die Kurzschlußstromstärke zwischen den Bürsten *bb* beträgt etwa 40% des Nutzstromes. Bei veränderlicher Geschwindigkeit bleibt demnach die Stromstärke bei konstantem Widerstande nahezu konstant, nachdem eine gewisse Drehzahl überschritten ist. Die Stärke des Nutzstromes wird durch die Erregung eingestellt.

Da die Stromrichtung in dem kurzgeschlossenen Kreise von der Drehrichtung der Maschine abhängt, so werden mit der Umkehrung der Drehrichtung auch die Quermagnetisierungen umgekehrt. Die Maschine liefert also trotz der Fremderregung bei beliebiger Drehrichtung einen Strom von gleichbleibender Richtung. Die Maschine wird u. a. für den Betrieb elektrischer Eisenbahnwagenbeleuchtung verwendet. Parallel zu den Bürsten *B B* ist dann wie in Abb. 204 eine Akkumulatorenbatterie geschaltet, die Spannung ist daher durch diese gegeben. Die Maschine liefert bereits bei sehr geringen Geschwindigkeiten Strom, wenn der Widerstand nicht zu groß ist.

Ist die Drehzahl konstant, dagegen der Widerstand des äußeren Kreises veränderlich, so ist der Kurzschlußstrom nur wenig größer als der normale, dagegen wird die Spannung bei großem Widerstand sehr groß. Man kann die Maschine dann durch Schmelzsicherungen im Kurzschlußkreise *b b* sichern. Die Maschine eignet sich dann gut zum Betrieb von Scheinwerfern und zum elektrischen Schweißen.

(419) Dreileitermaschinen sind Maschinen, an die auch der Mittelleiter eines Dreileitersystems angeschlossen werden kann. Anordnungen, bei denen der Hilfsleiter direkt an eine auf dem Kommutator schleifende Bürste angeschlossen wird, sind von Kingdon und Dettmar angegeben worden, vgl. ETZ 97, S. 230. Es wechselt immer ein Paar Nordpole mit einem Paar Südpole ab, während der Anker für die halbe Polzahl gewickelt ist. Nach Dettmar werden die Spulen der ungeraden und die der geraden Pole zu je einem Erregerkreise zusammengefaßt, die durch getrennte Regulierwiderstände einzeln reguliert werden können. Zu gleichem Zwecke dient der Spannungsteiler von Dolivo-Dobrowolsky[1]). Er besteht aus einer meistens außerhalb der Maschine angebrachten Drosselspule (Abb. 205), die (durch Schleifringe) mit zwei Punkten *C* und *D* der Ankerwicklung verbunden ist, die bei einer zweipoligen Maschine um 180° auseinander liegen. Der Nulleiter wird an den Mittelpunkt *O* der Drosselspule angeschlossen. In der Drosselspule fließt dauernd ein Wechselstrom, dessen Stärke wegen der hohen Selbstinduktion nur sehr gering ist. Da in jedem Augenblick die Spannung zwischen *A* und *C* gleich der zwischen *B* und *D* ist, und Punkt *O* die Spannung zwischen *C* und *D* in zwei gleiche Teile teilt, so muß auch stets die Spannung zwischen *A* und *O* gleich der zwischen *B* und *O* sein. Bei Belastungsverschiedenheiten in den beiden Hälften des Dreileitersystems fließt die Differenz der Ströme über *O* zum Anker zurück. Dabei können Wechselströme von der dreifachen Frequenz auftreten, die sich im äußeren Stromkreise über den Gleichstrom lagern und z. B. ein Singen der Bogenlampen verursachen; man kann sie durch eine kleine Spule abdrosseln. Vgl. ETZ 1901, S. 357.

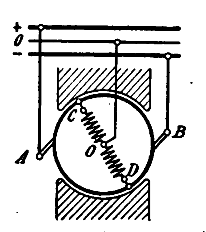


Abb. 205. Spannungsteilung nach Dobrowolsky.

Bei der Dreileitermaschine von Ossanna ist auf dem Anker außer der Kommutatorwicklung noch eine Drehstromwicklung, etwa eine aufgeschnittene (447), in Sternschaltung angebracht. Die Enden dieser Wicklung sind an drei Punkte der Gleichstromwicklung angeschlossen, die bei einer zweipoligen Maschine um je 120° auseinander liegen; der Nullpunkt wird über einen Schleifring mit dem Nulleiter verbunden. Die Wirkungsweise ist ähnlich wie im vorigen Fall.

Ein Nachteil dieser Spannungsteilungen ist der, daß man die Spannungen der beiden Netzhälften nicht unabhängig voneinander regulieren kann. Sie eignen sich daher nur für Anlagen mit geringen Spannungsverlusten in den Leitungen und nicht allzu großen Verschiedenheiten in der Belastung der Netzhälften (bei Dobrowolsky 15%, bei Ossanna 25% der Maschinenleistung).

[1]) A. Buch, Über Spannungsteilung bei Gleichstrommaschinen. Diss. Braunschweig 1912.

(420) Parallel- und Reihenschaltung der Maschinen. In größeren Anlagen werden in der Regel mehrere Maschinen aufgestellt, die durch Parallel- oder Reihenschaltung miteinander verbunden werden. Am bequemsten und häufigsten ist die Parallelschaltung der Nebenschlußmaschinen. Es ist nur darauf zu achten, daß die Maschinen gleiche Spannung und gleiche Polarität besitzen. Die Polarität ist gewährleistet bei der Netzerregung (Abb. 206 *a*). Man schließe bei der zuzuschaltenden Maschine den Erregerkreis durch den linken Schalter A_1 und den Regulierwiderstand, stelle die richtige Spannung ein und schließe dann den rechten Schalter A_2. Die Maschine läuft nunmehr auch nach dem Parallelschalten leer und wird erst dadurch belastet, daß man sie stärker erregt. Der Ankerstrom ist nämlich $I_a = (E - P)/R_a$, d. h. gleich dem Überschuß der EMK E über die Sammelschienenspannung P dividiert durch den Ankerwiderstand R_a. Bei der Selbsterregung (Abb. 206 *b*) ist auf richtige Polarität zu achten, man verwendet daher polarisierte Spannungszeiger, z. B. Drehspuleninstrumente. In diesem jetzt üblichen Falle versieht man die Ankerkreise zweckmäßig mit doppelpoligem Schalter.

Bei Doppelschlußmaschinen müssen nicht bloß die Maschinen im ganzen, sondern auch die Anker und die Hauptschlußwicklungen für sich parallel geschaltet werden. Man schaltet zunächst durch einen doppelpoligen Schalter die Hauptschlußwicklung an die eine Netzschiene und eine dritte Schiene. Dadurch erhalten zwar die bereits laufenden Maschinen einen Spannungsstoß, weil ihre

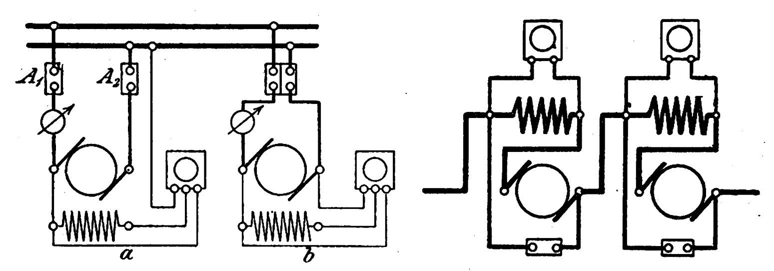


Abb. 206. Parallelschaltung zweier Nebenschlußmaschinen.

Abb. 207. Reihenschaltung zweier Reihenschlußmaschinen.

Hauptschlußwicklungen plötzlich von einem schwächeren Strom durchflossen werden, doch wird dabei die Leistung der Maschinen kaum geändert. Hierauf erteilt man dem Anker dieselbe Spannung, die die anderen Anker haben, und schließt ihn durch einen einpoligen Schalter an die Ankersammelschienen an.

Bekommt eine Doppelschlußmaschine Rückstrom, so wirkt die Reihenschlußwicklung entmagnetisierend und somit verstärkend auf den Rückstrom ein. Hierdurch entsteht die Gefahr der Umpolarisierung der Maschinen. Der Parallelbetrieb der Doppelschlußmaschine erfordert daher größte Aufmerksamkeit, und man vermeidet diese Art von Maschinen besonders bei allen Akkumulatorenanlagen.

Reihenschlußmaschinen sind mehrfach in großen Anlagen, die dann mit konstanter Stromstärke arbeiten, **hintereinander geschaltet** worden (Abb. 207), System Thury. Zur Regulierung der Spannung erhalten sie einen Regulierwiderstand, der parallel zur Erregerwicklung geschaltet ist. Wird der Widerstand kurz geschlossen, so verliert die Maschine ihre Spannung; je mehr Widerstand eingeschaltet wird, um so stärker wird der Strom, der durch die Erregung geht, und um so höher die Spannung der Maschine. Zum Einschalten einer Maschine wird zunächst der Ausschalter, der sie kurzschließt, geöffnet. Die Maschine wird sodann bei kurz-

geschlossener Erregerwicklung in Gang gesetzt. Sodann wird der Regulierwiderstand so weit verstellt oder auch die Drehzahl so weit erhöht, bis die gewünschte Spannung erreicht ist. Vgl. ETZ 1902, S. 1001.

Gleichstrommotoren.

(421) Generator und Motor. Sinkt an einer Gleichstrom-Dynamo, die an ein Netz von konstanter Spannung angeschlossen ist, die EMK so weit, daß in der Gleichung $I_a = (E-P)/R_a$ E kleiner als P wird, so kehrt sich die Richtung des Stromes um, und der Generator wird zum Motor. Während beim Generator EMK und Strom gleichen Richtungssinn hatten, fließt nun der Strom entgegengesetzt der EMK; man spricht daher wohl von „gegenelektromotorischer Kraft". Es gilt aber genau wie in (408) und (409)

$$E = \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot z_{ges} \Phi 10^{-8} \text{ Volt} \tag{1}$$

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{10^{-8}}{9{,}81} \cdot \frac{p}{a} \cdot z_{ges} \Phi I_a \text{ Kilogrammeter} \tag{2}$$

woraus folgt, daß

$$E I_a = \frac{2\pi n}{60} D \frac{\text{kg*m}}{\text{s}} = 9{,}81 \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot D \text{ Watt.} \tag{3}$$

oder in Worten: Die vom Anker aufgenommene elektrische Leistung ist der mechanischen Leistung äquivalent. D ist das Drehmomnt in kg*m, n die Drehzahl in der Minute.

Bei sonst gleich gebauten Motoren ändert sich das Drehmoment direkt proportional mit der Drahtzahl auf dem Anker, die Drehzahl umgekehrt proportional mit ihr, wie aus Gl. 1) und 2) ohne weiteres hervorgeht. Will man hiervon Gebrauch machen, um Motoren von verschiedenen Geschwindigkeiten zu bauen, so ist zu beachten, daß sich mit der Windungszahl auch der Widerstand des Ankers, und zwar angenähert quadratisch ändert.

(422) Umsteuerung der Motoren. Soll die Drehrichtung eines Gleichstrommotors geändert werden, so muß die Stromrichtung entweder in der Erregerwicklung oder im Anker umgekehrt werden, während die Umkehrung der Richtung des dem Motor zugeführten Gesamtstromes auf die Drehrichtung ohne Einfluß ist.

(423) Einteilung. Die Gleichstrommotoren werden nach der Art, wie die Erregung geschaltet ist, eingeteilt in

1. fremderregte Motoren
2. Nebenschlußmotoren
} (wesentlichste Eigenschaft: angenähert gleichbleibende Geschwindigkeit bei allen Bremsbelastungen),
3. Reihenschlußmotoren } (wesentlichste Eigenschaft: Abfall d. Geschwindigkeit bei zunehmender Bremsbelastung, Drehmoment nur von der Stromstärke abhängig),
4. Doppelschlußmotoren
   a) mit gegensinnig geschalteten Erregerwicklungen (wesentlichste Eigenschaft: konstante Geschwindigkeit),
   b) mit gleichsinnig geschalteten Erregerwicklungen (Eigenschaften zwischen denen der Nebenschluß- und der Reihenschlußmotoren).

Gleichstrommotoren werden normal ausgeführt für 110, 220, 440 und 500 V. Bei größeren Motoren liegt die durch den Kommutator gegebene Spannungsgrenze im allgemeinen bei 1000 V, in Ausnahmefällen bei 2000 bis 3000 V.

(424) Der fremderregte Motor. Hält man die Erregung konstant, so ist, solange die Ankerrückwirkung keinen Einfluß gewinnt, das Drehmoment proportional mit I_a. Die Kurve der Stromstärke über dem Drehmoment steigt daher gerad-



linig vom Nullpunkt aus an und geht später in eine konkav nach oben gekrümmte Kurve über, sobald der Einfluß der Ankerrückwirkung bemerkbar wird. Ändert man die Erregung, so nimmt bei schwach gesättigtem Eisen das Drehmoment proportional mit der Erregung zu oder ab, die Ankerstromstärke bei gleichbleibender Bremsbelastung daher entsprechend ab oder zu, bei gesättigtem Eisen erweist sich die Veränderung der Erregung innerhalb der Sättigungsgrenze natürlich als wirkungslos. Unerregte Motoren haben ein sehr kleines Drehmoment, falls nicht durch extreme Verstellung der Bürsten die Maschine vom Anker aus erregt wird, oder nennenswerte Remanenz vorhanden ist.

Bei Leerlauf kann, da dann die Stromstärke entsprechend der lediglich zur Überwindung der Reibung aufzuwendenden Leistung sehr klein ist, $E = P$ gesetzt werden. Die Geschwindigkeit ist daher bei Leerlauf, und wenn die Bürsten in der neutralen Zone stehen, praktisch gleich der Geschwindigkeit, bei der der leerlaufende Generator die Spannung P erzeugt. Wird der Motor belastet, so sinkt bei konstantem P die Geschwindigkeit und die Gegen-EMK E so weit, bis der Strom genügend stark geworden ist, um das erforderliche Drehmoment zu erzeugen. Dieser Abfall ist bei großen Motoren sehr gering, bei kleinen Motoren mit verhältnismäßig hohem Ankerwiderstand bemerkbarer.

Geschwindigkeitsregelung. Vergrößert man den Spannungsabfall künstlich durch Vorschalten von Widerstand vor den Anker, so verringert sich die Geschwindigkeit um einen dem Spannungsabfall im Vorschaltwiderstand proportionalen Betrag, allerdings nur auf Kosten der im Widerstand verlorenen Leistung und immer nur dem jeweiligen Werte des Produktes $I_a R_a$ entsprechend, so daß bei stark belastetem Motor ein großer, bei schwach belastetem Motor ein geringer Abfall der Geschwindigkeit eintritt. Läßt man beim fremderregten Motor die Ankerspannung unverändert, und ändert man die Erregung, so folgt aus $E = c_1 \Phi n$, daß die Geschwindigkeit um so größer wird, je geringer der Induktionsfluß wird. Man kann auf diese Weise also in umgekehrtem Sinne regulieren wie bei der soeben beschriebenen Methode. Das Verfahren ist in zweifacher Hinsicht besser. Der Leistungsverlust im Regulierwiderstande ist gering, weil im ganzen Erregerkreis nur einige Hundertstel der Leistung verbraucht werden; und die Einstellung der Geschwindigkeit ist von der Belastung unabhängig. Anderseits ist zu beachten, daß infolge der Abschwächung des Induktionsflusses das Drehmoment für gleich starken Ankerstrom geringer wird, die gleiche Bremsbelastung also nur mit stärkerem Strom durchgezogen werden kann. Daß der Strom stärker werden muß, ergibt sich übrigens auch daraus, daß ja durch die höhere Geschwindigkeit eine höhere Leistung bedingt wird. Wird in sehr weitgehendem Maße im Nebenschluß reguliert, so macht sich die infolge der Ankerrückwirkung auftretende Feldverzerrung durch starkes Feuern des Kommutators sehr störend bemerkbar. Will man daher in weiten Grenzen regulieren, so ist der Feldverzerrung durch Kompensationswicklungen, Wendepole oder dgl. zu begegnen (384 u. 385). Wird die Ankerstromstärke künstlich konstant gehalten (Reihenschaltung mehrerer Motoren), so hat die Abschwächung des Feldes eine Verringerung der Geschwindigkeit bei gleichzeitigem Sinken der Ankerspannung zur Folge..

Durchgehen des Motors. Bei allzusehr geschwächter Erregung, z. B. bei Unterbrechung des Erregerkreises, nimmt der einmal laufende Motor bei geringer Bremsbelastung eine sehr hohe Geschwindigkeit an („er geht durch"), und es tritt eine Gefährdung des Ankers durch die Zentrifugalkraft ein. Es ist daher der Konstruktion und Ausführung der Erregerkreise besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden; Sicherungen dürfen im Erregerkreise nicht angebracht werden, und etwaige Schalter sind so anzuordnen, daß sie ihn nicht öffnen oder kurzschließen können, ohne daß zugleich der Ankerkreis geöffnet wird.

Kritische Geschwindigkeit. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit, die nur infolge Antriebs des Motors von einer anderen Kraftquelle aus eintreten kann, wird die EMK gleich der Ankerspannung. Der Anker wird dann

stromlos und nimmt weder elektrische Leistung auf, noch gibt er solche ab. Unterhalb dieser kritischen Geschwindigkeit, deren Höhe durch die Erregung eingestellt werden kann, ist $P > E$; der Anker nimmt daher elektrische Leistung auf, und die Maschine läuft als Motor. Oberhalb der kritischen Geschwindigkeit ist $E > P$; der Strom fließt jetzt im Anker umgekehrt, während der Erregerstrom seine Richtung beibehält. Das Drehmoment hat sich daher auch umgekehrt. Der Motor nimmt jetzt mechanische Leistung auf und gibt elektrische Leistung ab, er läuft als Generator.

Kuppelt man daher zwei gleiche fremderregte Maschinen und schaltet man ihre Anker bei gleicher Erregung auf dasselbe Netz, so laufen beide leer als Motoren. Erregt man nun die eine Maschine um ein geringes stärker, so wächst ihre EMK, und sie läuft als Generator, die andereMaschine als Motor. Durch stärkere Erregung der anderen Maschine kehrt sich der Vorgang um. Äußerlich kann man den Maschinen nicht ansehen, welche als Generator, welche als Motor läuft. Da eine absolut genaue Übereinstimmung zweier Motoren praktisch kaum zu erreichen ist, so verlangt die Anwendung mechanisch gekuppelter und parallel geschalteter fremderregter oder Nebenschlußmotoren (Fahrzeugantrieb) große Vorsicht.

(425) Leonardsche Schaltung. Man macht von diesem Verhalten bei der Ward Leonard-Schaltung, Abb. 208, Gebrauch. Der Motor ist von einer fremden Stromquelle immer voll erregt. Der Generator, der auf irgend eine Weise, häufig als Teil eines Ilgner-Motor-Generators angetrieben wird, läuft mit wechselnder Erregung, die von dem positiven Maximum über Null bis zum negativen Maximum verändert werden kann. Die Anker beider Maschinen sind ohne Einfügung von Schaltern, Sicherungen oder Regulierwiderständen in Reihe geschaltet. Dann ist die Geschwindigkeit des Motors durch die Erregung des Generators völlig bestimmt und in der bequemsten Weise einzustellen. Wird die Erregung des Generators verstärkt, so wächst der Strom im Ankerkreise, und der Motor wird beschleunigt; wird die Erregung des Generators abgeschwächt, so sinkt die Stromstärke, ja sie kann sich leicht umkehren. In diesem Falle läuft der Motor als Generator, er wird stark gebremst und nimmt daher sehr schnell eine geringere Geschwindigkeit an, bei der er wieder als Motor läuft.

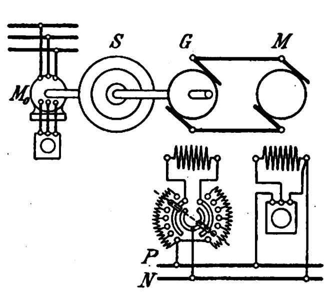


Abb. 208. Ilgner-Motor-Generator mit Leonard-Schaltung.

(426) Der Nebenschlußmotor verhält sich, solange er mit konstanter Spannung gespeist wird, durchaus wie der fremderregte Motor. Er hat daher die Eigenschaft, seine Geschwindigkeit unabhängig von der Größe der Belastung im wesentlichen konstant zu halten. Bemerkenswert ist, daß bei dauerndem Betrieb die Erregerwicklung warm und ihr Widerstand daher größer wird. Der Erregerstrom selbst wird dann schwächer, und ein mit geringer Eisensättigung arbeitender Motor läuft, weil weniger erregt, schneller. Die Geschwindigkeit wird dann ebenso wie die des fremderregten Motors reguliert. Da bei sinkender Klemmenspannung die Erregung nachläßt, so ist das Drehmoment und die Anzugskraft des Nebenschlußmotors von der Spannung sehr stark abhängig. Wo also große Zugkräfte bei hohem Widerstand der Zuleitungen zum Motor gefordert werden (z. B. im Straßenbahnbetrieb) erweist sich der Nebenschlußmotor als ungünstig. Auch der Nebenschlußmotor kehrt seine Wirkung um, sobald er die kritische Geschwindigkeit überschreitet. Man macht hiervon z. B. Gebrauch bei der Talfahrt auf elektrischen Bahnen und beim Niederlassen von Aufzügen. Sind mehrere parallelgeschaltete Nebenschlußmotoren miteinander gekuppelt, so hängt das Arbeiten der einzelnen Maschinen

als Motor oder als Generator von ihrer Erregung ab. Die stärker erregte Maschine arbeitet als Generator, die schwächer erregte als Motor. Beim Fahrzeugbetrieb verlangt die Verwendung parallelgeschalteter Nebenschlußmotoren daher große Vorsicht. Anderseits macht man von diesem Verhalten nützlichen Gebrauch zum Ausgleich der Belastungen der beiden Netzhälften von Dreileiteranlagen (Ausgleicher), ferner zur Belastung und Prüfung von Maschinen. Nebenschlußmotoren mit Wendepolen können ins Schwingen geraten und sogar völlig instabil werden, so daß sich die Schwingungen vergrößern, wenn das Hauptfeld durch die Ankerströme zu stark geschwächt wird[1]).

(427) **Der Reihenschlußmotor** (auch Hauptstrommotor oder Serienmotor genannt) wird durch den Ankerstrom erregt, daher ist sein Drehmoment lediglich von der Stromstärke abhängig. Das Sinken der Klemmenspannung hat keine Verminderung der Anzugskraft und des Drehmomentes, sondern nur eine Abnahme der Drehzahl zur Folge, bis Stillstand erreicht ist. Der Induktionsfluß Φ ist bei geringer Stromstärke proportional mit I und das Drehmoment proportional mit I^2. Bei größerer Sättigung wird Φ annähernd konstant, und D nimmt dann proportional mit I zu. Wird endlich die Ankerrückwirkung beträchtlich, so nimmt D langsamer zu, als dem linearen Gesetz entspricht. Daraus ergibt sich die Kurve des Drehmomentes über der Stromstärke und umgekehrt der Stromstärke über dem Drehmoment, Abb. 209.

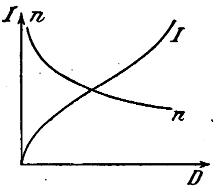


Abb. 209. Verhalten des Reihenschlußmotors.

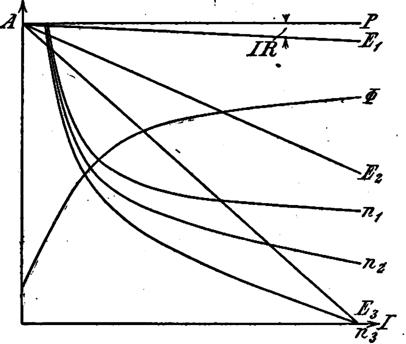


Abb. 210. Geschwindigkeiten des Reihenschlußmotors bei verschiedenen Widerständen.

(428) Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Belastung. Da sich beim Reihenschlußmotor die Erregung mit der Belastung ändert, so läuft der stark belastete Motor langsamer, der schwach belastete schneller. Man übersieht die Verhältnisse leicht bei Betrachtung von Abb. 210. Es ist stets

$$P = E + IR \quad \text{und} \quad n = \frac{E}{c \cdot z\Phi}.$$

Kennt man die Magnetisierungskurve Φ über I und den Widerstand R des Motors, so findet man aus dieser Formel die Drehzahl n für einen beliebigen Belastungszustand I, indem man Φ und E aus den Kurven, Abb. 210, abgreift. Wird dem Anker Widerstand vorgeschaltet, so erhöht sich der Spannungsverlust IR; im Diagramm nimmt die Gerade AE eine zur Abszissenachse stärker geneigte Lage (AE_2, AE_3 ...) an. Aus dem neuen Werte der Gegen-EMK ermittelt man wie vorher den Verlauf von n. Abb. 210 zeigt die Drehzahlen für R, $8R$ und $16R$.

[1]) Wagner, K. W., Unstabile Betriebszustände bei Gleichstrommaschinen. ETZ 1907, S. 286. — Rosenberg, Über das Pendeln von Gleichstrom-Wendepolmotoren. The Electrician, London, 4. Aug. 1911. — Humburg, Das Pendeln bei Gleichstrommotoren mit Wendepolen. Diss. München 1912. Springer, Berlin.

Das Verhalten des Reihenschlußmotors bringt die Gefahr des Durchgehens bei schwacher Belastung mit sich, hat aber für viele Betriebe die Annehmlichkeit, daß die Geschwindigkeit von selbst um so geringer wird, je größer die Belastung wird. Es steigt daher die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung nicht proportional mit dem Drehmoment, wie es angenähert beim Nebenschlußmotor der Fall ist, sondern in geringerem Maße.

(429) Geschwindigkeitsregulierung durch Feldveränderung (424) ist beim Reihenschlußmotor möglich, indem ein Regulierwiderstand parallel zur Erregerwicklung geschaltet wird. Für diesen Fall findet man die Drehzahlen aus Abb. 210, wenn man die Stromverzweigung im Erregerkreis berücksichtigend den Abszissenmaßstab so wählt, daß nur die wirklich zur Erregung dienende Stromstärke darin zum Ausdruck kommt.

(430) Sehr beliebt zur Geschwindigkeitsregulierung ist endlich bei Reihenschluß die Verwendung zweier mechanisch miteinander verbundener Motoren und deren Reihen- oder Parallelschaltung nach Wahl. Diese ergibt eine Geschwindigkeitsveränderung im Verhältnis 1 : 2. Parallelschaltung zweier Reihenschlußmotoren ist im Gegensatz zur Parallelschaltung gekuppelter Nebenschlußmotoren unbedenklich. Hier ist ja die Erregung eine Funktion der Leistung, und es ergibt sich daher eine praktisch ausreichende Selbstregulierung der Belastungsverteilung.

(431) Die Umkehrung der Motorwirkung in Generatorwirkung tritt beim Reihenschlußmotor ein, wenn seine Drehrichtung geändert wird. Eine vorübergehende Generatorwirkung tritt ferner ein, wenn ein noch im Gang befindlicher Motor umgesteuert, d. i. auf entgegengesetzten Drehsinn geschaltet wird. Dies letztere Verfahren, das vielfach „Gegenstrom geben" genannt wird, gefährdet infolge der auftretenden außerordentlichen Erhöhung der Stromstärke den Motor und ist daher im allgemeinen unzulässig. Eine Generatorwirkung kann endlich erzielt werden, wenn der Reihenschlußmotor vom Netz abgeschaltet und auf geeignete Widerstände geschlossen wird. Hierbei ist aber eine Umschaltung der Erregung erforderlich (Abb. 211a und b), weil sonst der Motor den Magnetismus verliert. Von dieser dritten Möglichkeit wird vielfach Gebrauch gemacht, wo es gilt, die in bewegten Massen aufgespeicherte Energie schnell zu beseitigen; man nennt das Verfahren „Kurzschlußbremsung".

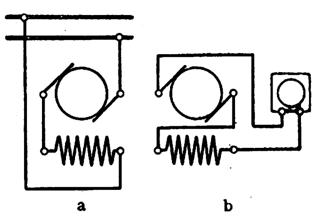


Abb. 211. Reihenschlußmotor in normaler und in Bremsschaltung.

(432) Die **Doppelschlußschaltung** der Erregung kann in zweierlei Weise Anwendung finden. Die Hauptschlußwicklung kann erstens so geschaltet werden, daß die Geschwindigkeit noch weniger von der Belastung abhängt als beim Nebenschlußmotor. Wenn nämlich bei letzterem infolge stärkerer Belastung die Geschwindigkeit sinkt, so kann man durch eine vom Ankerstrom durchflossene Wicklung, die magnetisch der Nebenschlußwicklung entgegenwirkt, das Feld schwächen und damit die Geschwindigkeit wieder erhöhen. Eine genaue Einstellung ist natürlich nur für solche Sättigungszustände möglich, bei denen $\Delta\Phi$ und $\Delta(mI)$ einander proportional sind. Die Schaltung ist dann genau dieselbe wie die des Doppelschluß-Generators; da aber beim Motor der Ankerstrom umgekehrte Richtung hat, so wirken hier die beiden Erregerwicklungen einander entgegen, und es kann bei starker Belastung der Motor gänzlich entmagnetisiert werden. Derartig geschaltete Motoren sind daher mit Vorsicht zu benutzen und werden selten angewendet.

Schaltet man zweitens die Reihenschlußwicklung so, daß sie die Nebenschlußwicklung unterstützt, so erhält man einen Motor, dessen Verhalten in der Mitte zwischen dem eines Nebenschluß- und eines Reihenschlußmotors steht. Seine

Geschwindigkeitsschwankungen sind bei Belastungsänderungen daher größer als die des Nebenschlußmotors, anderseits ist sein Drehmoment weniger von der Spannung abhängig. Motoren dieser Art gestatten eine ziemlich weitgehende Regulierung der Geschwindigkeit ohne Anwendung von Widerständen im Ankerkreis. Sie ermöglichen ferner eine Generatorwirkung bei Antrieb durch die Last sowie ein sicheres Durchziehen großer Überlasten und finden daher hin und wieder Verwendung bei Walzenzugsmaschinen, Fahrzeugbetrieb und dgl. Vgl. Hobart, Motoren, S. 155, Elektr. Bahnen u. Betriebe 1905, S. 632.

(433) Benutzung verschiedener Betriebsspannungen für den Ankerstromkreis zur Geschwindigkeitsregulierung von Gleichstrommotoren. Beim Nebenschlußmotor muß die Erregung ungeändert bleiben. Während daher die Erregerwicklung mit konstanter Spannung gespeist wird, werden dem Anker verschieden große Spannungen zugeführt, z. B. durch Anschluß an die Außenleiter oder an eine Hälfte eines Dreileitersystems oder durch Anschluß an mehr oder weniger Zellen einer Akkumulatorenbatterie oder endlich durch Einfügung einer z. B. durch eine Hilfsmaschine erzeugten elektromotorischen Kraft in den Ankerkreis, die entweder die Spannung unterstützt oder ihr entgegenwirkt. Die eingehendere Erörterung dieser Methoden gehört in das Kapitel der Kraftübertragung und der elektr. Bahnen (745).

(434) Anlassen der Gleichstrommotoren. Bei Stillstand ist die Gegen-EMK gleich Null; daher hat die volle Ankerspannung einen sehr starken Strom durch den Anker und bei Nebenschlußmotoren eine Verringerung der Anzugskraft wegen des großen Spannungsabfalls auf den Zuleitungen zur Folge. Die Strom-

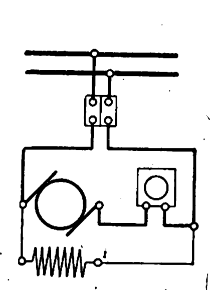


Abb. 212. Schaltung des Anlassers beim Nebenschlußmotor.

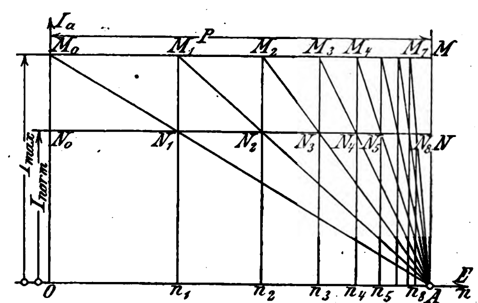


Abb. 213. Diagramm zum Anlassen des Nebenschlußmotors.

stärke muß daher im allgemeinen durch einen Widerstand — Anlasser — in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Der Anlasser wird genau wie der Regulierwiderstand für die Geschwindigkeitsregulierung beim Reihenschlußmotor in den Hauptkreis und beim Nebenschlußmotor (Abb. 212) in den Ankerkreis geschaltet, er kann aber kleiner bemessen werden als jener Regulierwiderstand, da er nur kurze Zeit vom Strom durchflossen wird. Der Widerstand des Anlassers wird bei größeren Motoren in der Regel so gewählt, daß beim Einschalten nur ein Bruchteil der vollen Stromstärke, etwa ein Drittel, auftreten kann. Durch Abschalten der ersten Stufen wächst die Stromstärke, bis der Motor anläuft. Bei vollem Drehmoment erfolgt dies bei etwas größerer Stromstärke als der normalen, weil Beschleunigungsarbeit zu leisten und weil die Reibung der Ruhe erheblich ist; für geringere Drehmomente sind entsprechend geringere Stromstärken erforderlich. Sowie der Motor läuft, entsteht im Anker eine Gegen-EMK, die ein Sinken der Stromstärke veranlaßt. Die Geschwindigkeit steigt dabei so lange, bis die Ankerstromstärke den kleinsten Wert erreicht hat, bei dem das erforderliche Drehmoment noch vorhanden ist, während vorher das überschüssige Drehmoment zur Beschleunigung verwendet wurde.

Durch weiteres Ausschalten von Widerstand steigt I_a wieder, und so entsteht aufs neue ein überschüssiges Drehmoment, das wieder zur Beschleunigung verwandt wird. Der Motor nimmt daher fortgesetzt höhere Drehzahlen an, bis aller Widerstand ausgeschaltet ist.

Bei ganz kleinen Leistungen (Fächermotoren) kann man den Anlasser weglassen. Auch bei sehr großen Motoren, die dann zweckmäßig Fremderregung erhalten, kann der Anlasser unter Umständen wegbleiben, wenn sie ohne Last anlaufen und nur geringe Trägheitsmomente vorhanden sind. Dies ist z. B. der Fall beim Antrieb von Schiffsschrauben (bei Unterseebooten). Die Selbstinduktivität verhindert ein allzu starkes Anwachsen der Stromstärke. Den Schalter kann man nach Linke mit Vorkontakt und Widerstandsstufe versehen. (Vgl. Trettin, ETZ 1912, S. 759. — Linke, ETZ 1918, S. 453.)

(435) Die Abstufung der Anlasser (Görges, ETZ 1894, S. 644; Elektr. Bahnen 1906, S. 249; Erens, ETZ 1899, S. 277) wird am besten so gewählt, daß jeder Stufe derselbe Sprung in der Stromstärke entspricht. Die Belastung möge die Ankerstromstärke I_{norm} verlangen, bei der der Beharrungszustand eintritt, die beim Abschalten auftretende größte Ankerstromstärke sei I_{max}. Letztere richtet sich nach der Stufenzahl und nach der gewünschten Beschleunigung des Ankers. Beim Nebenschlußmotor können wir Φ innerhalb der Grenzen I_{norm} und I_{max} als konstant ansehen. Mithin ist die EMK E einfach der Drehzahl n proportional. Stellen daher die Abszissen einer Geraden AM, Abb. 213, z. B. AM_1, die EMKe dar und OA die Betriebsspannung P, so ist bei normaler Stromstärke die EMK im Anker gleich N_0N_2, der Spannungsverlust in dem den Anlaßwiderstand enthaltenden Ankerkreise N_2N, und die Drehzahl kann auch durch N_0N_2 dargestellt werden. Die Strecke OA entspricht dann der kritischen Drehzahl (424). Wird nun eine Stufe des Anlassers abgeschaltet, so steigt die Stromstärke auf $I_{max} = n_2M_2$. Das überschüssige Drehmoment vergrößert n und damit zugleich E, das längs der Geraden M_2A steigt, bis bei N_3 wieder der Beharrungszustand erreicht ist. Wie leicht zu sehen, ist

$$\frac{N_1N_2}{N_2N_3} = \frac{I_{max}}{I_{norm}} = \lambda.$$

Die Geschwindigkeitsstufen bilden daher eine geometrische Reihe. Die Widerstände des Ankerkreises einschließlich des Ankerwiderstandes selbst verhalten sich weiter wie die Spannungsverluste, also ist

$$\frac{R_a + R_1}{R_a + R_2} = \frac{N_1N}{N_2N} = \lambda,$$

wenn R_a der Ankerwiderstand, $R_1 R_2 \ldots$ die Anlaßwiderstände sind. Die Gesamtwiderstände und die Widerstandsstufen selbst wachsen also wie eine geometrische Reihe. Ist $NN_8 = R_a$, so ist $NN_7 = \lambda R_a$, $NN_6 = \lambda^2 R_a$ usw. Je mehr Stufen gewählt werden, um so geringer wird der Unterschied zwischen I_{max} und I_{norm}. Allgemein ist für m Stufen im ganzen, wenn zunächst beim Einschalten die Stromstärke I_{max} auftritt,

$$\lambda^m = \frac{P}{R_a I_{max}} \quad \text{oder} \quad \lambda = \sqrt[m]{\frac{P}{R_a I_{max}}},$$

woraus eine der beiden Größen λ und m zu berechnen ist, wenn die andere gegeben ist. Für 3% Spannungsverlust im Anker $\left(\frac{R_a I_{norm}}{P} = 0{,}03\right)$ erhält man folgende Tabelle:

$m = 5$	10	15	20	25	30	40	60
$\lambda = 2{,}02$	1,42	1,26	1,19	1,15	1,12	1,092	1,060

Die letzten Stufen müssen kleiner als der Ankerwiderstand werden, eine Regel, gegen die sehr oft gefehlt wird.

(436) Abstufung des Anlassers beim Reihenschlußmotor. Es ist zu beachten, daß Φ mit I wächst. Es ist jetzt

$$E = c \cdot n \Phi .$$

Für I_{norm} sei der Induktionsfluß Φ_{norm}. Hierbei ist

$$E_{norm} = c \cdot n \, \Phi_{norm} = c_1 \cdot n .$$

Man kann daher wie vorher, wenn OA (Abb. 214) die Spannung P darstellt, E_{norm} und n durch die Abszissen einer Geraden AM, z. B. AM_1, darstellen.

Bei I_{norm} stellt daher z. B. $N_0 N_2$ die EMK und die Drehzahl, $N_2 N'$ den Spannungsverlust $R I_{norm}$ in der Wicklung der Maschine und dem Anlasser dar. Wird nun eine Stufe des Anlassers abgeschaltet, so steigt die Stromstärke auf I_{max} und der Induktionsfluß auf Φ_{max}. Bei derselben Geschwindigkeit muß die EMK im Verhältnis Φ_{max}/Φ_{norm} steigen. Bestimmt man daher den Punkt P, für den

$$\frac{PM_0}{PN_0} = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{norm}} ,$$

zieht PN_2 und verlängert es bis zum Schnittpunkt M_2 mit $M_0 M'$, so ist $M_0 M_2$ die neue EMK. Nunmehr steigt aber die Geschwindigkeit, und die EMK wächst weiter bis $N_0 N_3$, wo bei der Stromstärke I_{norm} ein neuer Beharrungszustand eintritt.

Da nun

$$\frac{M_1 M_2}{N_1 N_2} = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{norm}} = \mu ,$$

$$\frac{M_1 M_2}{N_2 N_3} = \frac{I_{max}}{I_{norm}} = \lambda ,$$

so folgt:

$$\frac{N_1 N_2}{N_2 N_3} = \frac{\lambda}{\mu} .$$

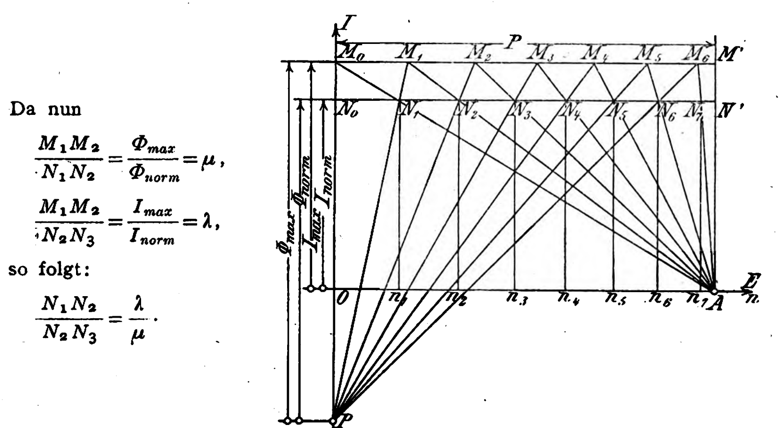


Abb. 214. Diagramm zum Anlassen des Reihenschlußmotors.

Demnach bilden die Geschwindigkeitsstufen wie in (435) eine geometrische Reihe. Bei geringer Sättigung fallen P und O zusammen, und μ wird gleich λ. Dann werden alle Stufen gleich groß. Bei großer Sättigung rückt P ins Unendliche, und Abb. 214 geht in Abb. 213 über. Die Abstufung ist dann genau wie beim Nebenschlußmotor.

Der dem Punkte N in Abb. 213 entsprechende Konvergenzpunkt der Abb. 214 fällt in die Verbindungslinie PA. Deshalb bilden die gesamten Widerstände hier keine geometrische Reihe, sondern nur die einzelnen Stufen. Aus einem Vergleich der Abb. 213 u. 214 erkennt man, daß bei einem Reihenschlußmotor bei Zulassung derselben Schwankungen in der Stromstärke viel weniger Stufen erforderlich sind, und ihre Abnahme viel geringer ist als beim Nebenschlußmotor.

Die bisher betrachteten Widerstände sind nur so groß, daß beim Einschalten sofort die maximale Stromstärke I_{max} auftritt. Dies ist aber in der Regel mit Rück-

sicht auf die Netzspannung unzulässig. Man muß daher noch eine Anzahl Stufen hinzufügen, so daß nur $^1/_5$ bis $^1/_3$ der vollen Stromstärke auftritt. Diese Stufen sind alle gleich groß zu wählen.

(437) Bei **Nebenschlußmotoren** ist es wichtig, daß die Erregerwicklung beim Abstellen nicht unterbrochen wird, man wähle daher eine solche Schaltung, daß der Erregerkreis stets durch den Anker geschlossen bleibt, wie. zB. in Abb. 215. Eine Schleifkurbel verbindet den Zapfen *Z* und zwei auf einem Kreis einander gegenüberliegende Kontakte miteinander. In der Stellung *AA* ist der Motor ausgeschaltet, die Erregerwicklung durch *W* und den Ankerkreis geschlossen. In Stellung *BB* ist der Motor eingeschaltet und voll erregt, der Anker aber durch *W* vor zu starkem Strom geschützt. In Stellung *CC* sind die Feldmagnete voll erregt und *W* ganz abgeschaltet; dies entspricht der Stellung bei normalem Lauf. Statt des Zapfens wird besser eine besondere Kreisschiene für die Verbindung mit der Erregerwicklung gewählt. Einfacher aber weniger gut ist es, die Erregerwicklung an einen Punkt *P* anzuschließen, der etwa der vollen Stromstärke im Anker bei Stillstand entspricht. Sowohl in der Stellung *BB* wie in der *CC* erhält dann die Erregerwicklung nicht ganz die volle Spannung, doch ist der Verlust im letzten Fall nicht erheblich, da der Anlaßwiderstand viel geringer ist als der Widerstand der Erregung.

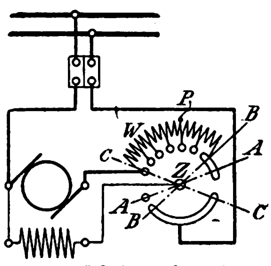


Abb. 215. Schaltung des Anlassers des Nebenschlußmotors.

Ausführliches über Anlasser und Regulierwiderstände (565) u. f.

Wechselstromdynamos.

(438) Synchrone und asynchrone Generatoren. Die synchronen Generatoren überwiegen in der heutigen Praxis bei weitem. Sie bestehen in der Regel aus einem feststehend angeordneten Anker mit offenen, halboffenen oder geschlossenen Nuten und dementsprechend umlaufenden Feldmagnet. Als asynchrone Generatoren können Induktions- und Kommutatormotoren benutzt werden (526). Maßgebend für den Bau eines Synchrongenerators ist die Stromart, die Leistung, die Spannung, die Frequenz, der durch die Belastung bestimmte Leistungsfaktor und die Geschwindigkeit. Die Bauart der Einphasenstrom-, Zweiphasen-, Drehstrom-, usw. Maschinen ist äußerlich dieselbe, der Unterschied liegt nur in der Wicklung und deren Schaltung.

(439) Die **Drehzahlen** sind bei Wechsel- und Drehstrommaschinen nicht beliebig, vielmehr bei gegebener Frequenz durch die Polzahl festgelegt, die stets gerade sein muß. Als normale Umdrehungszahlen hat der V D E die in den Normalien angegebenen empfohlen. Abweichungen sind aber infolge der Verschiedenartigkeit der Antriebsmaschinen unvermeidlich.

Bei großen Maschinen ist es der Zerlegbarkeit wegen zu empfehlen, daß die Polpaarzahl p durch 4 teilbar sei.

(440) Die **Polzahl** richtet sich nach der verlangten Frequenz f und der Drehzahl n.

Aus der Gleichung $p \cdot \frac{n}{60} = f$ folgt die Polzahl $p = \frac{60 f}{n}$.

(441) Der **Blechschnitt** des Ankers wird einheitlicher Fabrikation wegen meist so entworfen, daß die Nutenzahl durch drei teilbar ist; damit sind die Schnitte zugleich für Drehstrom- und Einphasenmaschinen geeignet. Für letztere stellt

man auch besondere Schnitte her, bei denen, wenn es sich um vielpolige Maschinen handelt, zwecks bequemerer Einlegung der Ankerspulen, die Nuten für je zwei Spulenseiten einer Spule parallel gestellt werden können.

Die Zahl der Nuten kann um so größer gewählt werden, je größer die Umfangsgeschwindigkeit und je geringer die Frequenz ist. Man nimmt bei Drehstrom mindestens 12 Nuten für je ein Polpaar, bei Turbodynamos 30 und mehr. Große Nutenzahl ist für Erzeugung einer möglichst sinusartigen Kurve der elektromotorischen Kraft und für geräuschlosen Gang der Maschine günstig; sie beeinträchtigt aber den für Isolation verfügbaren Raum und ist daher bei Maschinen für sehr hohe Spannung im allgemeinen um so weniger anwendbar, je höher die Frequenz ist.

Die Nutenformen, vgl. (358, 362), Abb. 157 bis 161, werden sehr verschieden gewählt. Die bei weitem bequemste und sauberste Fabrikation gestatten ganz offene Nuten; sie bedingen aber lamellierte Polschuhe, weil andernfalls die Verschiedenheit der magnetischen Induktion, die unter den Zähnen größer und unter den Nuten geringer ist, starke Wirbelströme in den Polschuhen erzeugt. Offene Nuten vergrößern ferner den Widerstand für den Übergang des Induktionsflusses von den Polen zum Anker durch die Luft und begünstigen endlich die Bildung von unerwünschten Oberschwingungen in dem periodischen Verlauf von Strom und Spannung. Wenn die radiale Tiefe des Luftspaltes gering ist, zeigen sich alle diese Einflüsse in empfindlicherer Weise und sind dann nur durch Anordnung relativ sehr großer Nutenzahlen zu beheben. Ganz geschlossene und

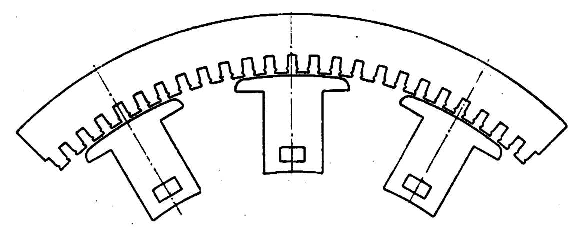


Abb. 216. Blechschnitt einer Wechselstrommaschine.

halb geschlossene Nuten sind in magnetischer Hinsicht und auch bezüglich der Fabrikation ziemlich gleichwertig, sie gestatten, den Induktionsfluß sehr gleichförmig im Luftspalt zu verteilen, schließen übermäßige Wirbelstrombildung in den Polschuhen aus, wenn sie sie auch nicht beseitigen, und erzeugen, solange die Zahnsättigung mäßig ist, Oberschwingungen in geringerem Maße. Der Eisenpfad, der an der der Bohrung zugekehrten Seite der ganz geschlossenen Nut stehen bleibt, erhöht die Ankerstreuung. Wird aber die Nut, wie bei halb geschlossener Ausführung, geschlitzt, wodurch zugleich vom Stanzen herrührende Materialspannungen beseitigt werden, so ist bei geeigneter Ausführung der Zahnköpfe, wie in Abb. 159, die Ankerstreuung nicht bedenklich. Die halb geschlossenen Nuten sind daher sehr beliebt. Sie bedingen aber den namentlich bei vieldrähtigen Wicklungen fühlbaren Nachteil, daß die Wicklung einzeln durch die Nuten gefädelt („genäht") werden muß (361).

Die Nutenbreite ergibt sich aus dem für Wicklung und Isolation erforderlichen Raum; sie darf nur so groß gewählt werden, daß die stehenbleibenden Zähne genügende mechanische Festigkeit für das Stanzen und etwaiges Ausdrehen des Ankers (wird meist nicht vorgenommen) und ausreichenden Querschnitt für den Durchgang des Induktionsflusses behalten. Die magnetische Induktion in den Zähnen ist dabei durch Rücksichten auf die Eisenverluste gegeben und wird bei Leerlauf und der für Beleuchtung üblichen Frequenz von 50 Per/s gegenwärtig zu 16000 bis 18000 Gauß angenommen; bei belasteter Maschine kann sie dann erheblich höher werden (448).

Das Verhältnis der Nutentiefe zur Nutenbreite darf ziemlich groß gewählt werden, doch wächst mit der Tiefe die Ankerstreuung. Zugleich wächst damit die Möglichkeit, daß sich bei größeren Drahtquerschnitten und besonders bei Stabwicklung die Stromstärke ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt (Stromverdrängung), was eine Erhöhung der Stromwärmeleistung zur Folge hat. Um dem zu begegnen, stellt man die Wicklung aus Litze her. Näheres hierüber siehe (398) und (99).

(442) Pole. Als Normalform für die Pole hat sich die der Abb. 148 bis 151 herausgebildet, soweit nicht genutete Zylinder, wie bei Turbodynamos, Abb. 152 und 153 in Frage kommen. Nach Möglichkeit gibt man den Polschäften runden oder quadratischen Querschnitt, vgl. (404). Die Polschuhform ist in erster Linie für den Verlauf der EMK, der möglichst einem Sinusgesetz folgen soll, maßgebend. Dazu werden die Polkanten zweckmäßig abgerundet, um plötzliches Anwachsen des Induktionsflusses in den einzelnen Zähnen zu verhüten. Von großer Bedeutung ist das Verhältnis des Polschuhbogens β zur Teilung τ, d. h. dem Abstand der Mittellinien zweier aufeinander folgender Pole. Ist β zu klein, so wird bei gegebenem Induktionsfluß die Sättigung in den Ankerzähnen zu groß; ist β zu groß, so ist die Streuung zwischen einander benachbarten Polhörnern sehr bedeutend. Aus diesen Erwägungen heraus wird das Verhältnis $\beta : \tau$ am besten etwa gleich $2 : 3$ gewählt. Die Polschuhe werden fast stets, die Polschäfte häufig aus Blechen hergestellt. Es genügten dafür Bleche von 1 mm Stärke.

(443) Normale Wicklung des Drehstromgenerators. Das Schema zeigen Abb. 217 u. 218, erstere mit 1 Nut für 1 Zweig und 1 Pol — einfache Nutenzahl —, letztere mit 3 Nuten für 1 Zweig und 1 Pol — dreifache Nutenzahl. Allgemein sprechen wir bei σ Nuten für 1 Zweig und 1 Pol von σ-facher Nutenzahl. Setzt man die

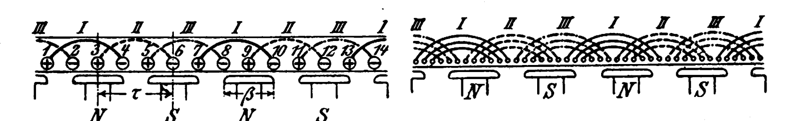


Abb. 217. Drehstromwicklung mit einfachen Nuten.

Abb. 218. Drehstromwicklung mit dreifachen Nuten.

Teilung gleich τ, so liegt der Anfang des Stromzweiges II um $^2/_3\ \tau$ hinter dem Stromzweig I und der Anfang des Stromzweiges III wieder um $^2/_3\ \tau$ hinter dem Stromzweig II. Laufen die Pole nach rechts um, so entsteht daher die eingeschriebene Zählung I II III I II III. Wird die Umlaufrichtung der Pole umgekehrt, so kehrt sich auch die Reihenfolge der Stromzweige um. Bezeichnet man die linken Seiten der Spulen mit dem Pluszeichen, die rechten Seiten mit dem Minuszeichen, so folgen in den Nuten aufeinander (Abb. 217), +I −III +II −I +III −II +I −III usw. An den Stirnseiten liegt abwechselnd eine Spule oder Spulengruppe höher, d. h. weiter vom Ankereisen entfernt, die nächste tiefer, also z. B. I höher, II tiefer, III höher, I tiefer, II höher, III tiefer usw. Bei Ausführung der Wicklung als Phasenwicklung mit Spulen oder Stäben ergibt sich, wenn die Zahl der Polpaare ungerade ist, die Notwendigkeit, eine Spule unsymmetrisch auszuführen (verschränkte Spule), d. h. sie zum Teil höher, zum Teil tiefer zu legen.

Abb. 219 und 220 zeigen schematisch einige Stabwicklungen. Wenn zwei Stäbe in einer Nut liegen, so kann man die Wicklung in überaus regelmäßiger Form nach Abb. 219 ausführen, die der Abb. 167 entspricht. Man muß sich die stark ausgezogenen Stäbe z. B. jedesmal oben, die schwach ausgezogenen unten liegend denken. Ist die Zahl der Nuten für einen Stromzweig und Pol ungerade, so kann man die Wicklung mit einem Stab in der Nut nach Abb. 220 ausführen. Die geringste Nutenzahl ist demnach 6 für ein Polpaar, sie wird aber sehr selten

gewählt, weil die Ankerstreuung dabei sehr groß wird und die Maschinen stark brummen. Man wählt, wie schon bemerkt, lieber 12 bis 30 Nuten auf ein Polpaar. Über Teillochwicklungen vgl. S e i d n e r, El. u. Maschb. 1910, S. 785.

Bei großen Maschinen ist es wichtig, die Wickelköpfe, d. h. die aus dem Eisen herausragenden Teile der Spulen durch starke Klammern in ihrer Lage festzuhalten, weil sie schon im normalen Betriebe, noch viel mehr aber bei Kurzschlüssen von sehr starken elektrodynamischen Kräften angegriffen werden.

(444) Stern- und Dreieckschaltung. Zunächst sind genau die drei Anfänge und die drei Enden der Zweige festzustellen. Schaltet man z. B. die Spulen je eines Zweiges hintereinander, so kann man als die Anfänge die Zuführungen zu drei Nuten ansehen, die in Abständen von je $^2/_3\ \tau$ aufeinander folgen, z. B. in Abb. 217 die Zuführungen zu den Nuten 1, 3 und 5, in Abb. 218 die zu der ersten, siebenten und dreizehnten Nut. Die drei Enden ergeben sich dann von selbst. Bei der Sternschaltung werden nun die drei Enden zu einem Nullpunkt 0, miteinander verbunden

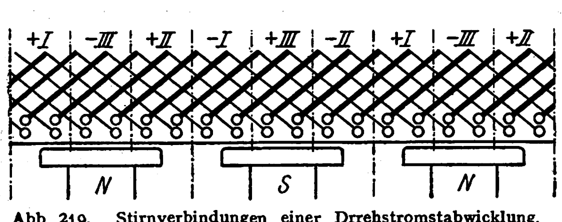


Abb. 219. Stirnverbindungen einer Drrehstromstabwicklung, 2 Stäbe/Nute, zweifache Nuten.

Abb. 221. Sternschaltung.

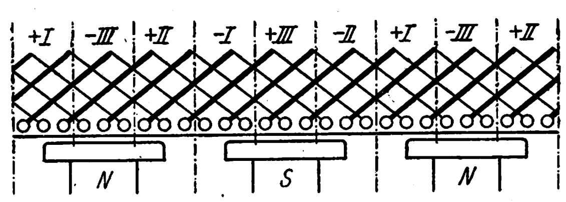


Abb. 220. Stirnverbindungen einer Drehstromstabwicklung, 1 Stab/Nute, dreifache Nuten.

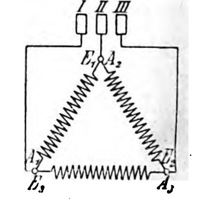


Abb. 222. Dreieckschaltung.

und die drei Anfänge A_1, A_2, A_3 zu den Klemmen geführt, Abb. 221. Bei der Dreieckschaltung wird E_1 mit A_2, E_2 mit A_3, E_3 mit A_1 verbunden, dabei werden die drei Verbindungspunkte zu den Klemmen geführt, Abb. 222. In den Schaltungen werden die drei Zweige in der Regel mit 120° Verstellung gegeneinander, entsprechend den Phasenverschiebungen der EMKe in ihnen, gezeichnet; es ergibt sich dann in Abb. 221 ein Stern, in Abb. 222 ein Dreieck.

Die Größe der drei Spannungen zwischen den Klemmen A_1 und A_2, A_2 und A_3, A_3 und A_1 heißt schlechthin die D r e h s t r o m s p a n n u n g; die Größe der bei der Sternschaltung auftretenden Spannungen zwischen dem Nullpunkt 0 und je einer der Klemmen A_1, A_2, A_3 ist das $1/\sqrt{3}$ fache jener Spannungen und heißt die S t e r n s p a n n u n g. Bei der Dreieckschaltung ist die Stromstärke schlechthin die Stärke der von den Klemmen nach außen führenden Ströme: in den drei Zweigen A_1E_1, A_2E_2, A_3E_3 fließen Ströme, deren Stärke das $1/\sqrt{3}$ fache jener Stromstärken ist.

Die Leistung der Drehstrommaschine ist bei gleicher Belastung der drei Zweige $\sqrt{3} \cdot P I \cos\varphi$, wenn P die Klemmenspannung, I die äußere Stromstärke und φ die Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke in jedem Zweige ist.

(445) Die **Wicklung der Zweiphasenmaschinen** besitzt zwei Spulengruppen, die um eine halbe Polteilung, d. h. um 90 elektrische Grade gegeneinander verschoben sind. Die **Wicklung der Einphasenmaschinen** wird wie die der Drehstrom- oder die der Zweiphasenmaschinen ausgeführt, indem man einen Zweig wegläßt — man kann dann die Wicklung immer wieder zu einer Mehrphasenwicklung ergänzen — oder die Stirnverbindungen werden so ausgeführt, daß die Überkreuzungen wegfallen. Im letzteren Falle, der weniger Wicklungsmaterial erfordert, erhält man kurze Spulen. Abb. 223 zeigt die erste, Abb. 224 die zweite Art der Wicklung.

Die Leistung der Zweiphasenmaschine ist $2 P I \cos\varphi$, wenn sich P und I auf je einen der Stromkreise beziehen; die der Einphasenmaschine $P I \cos\varphi$. Bei gleicher Größe und Drehzahl leistet die Einphasenmaschine etwa 70% von dem der Mehrphasenmaschine.

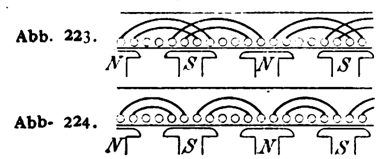


Abb. 223. Einphasenwicklung mit übergreifenden Spulen.
Abb. 224. Einphasenwicklung mit kurzen Spulen.

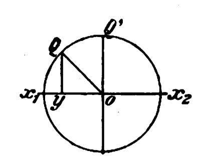


Abb. 225. Potentialdiagramm der Ankerwicklung.

(446) Potentialdiagramm. Läuft eine Windung, deren Öffnung gleich der Polteilung τ sein möge, mit gleichförmiger Geschwindigkeit in einem magnetischen Felde um, das räumlich nach einem Sinusgesetz über den Ankerumfang verteilt ist, so ändert sich die in ihr induzierte EMK nach einem Sinusgesetz. Bei anderer magnetischer Verteilung ersetzen wir die tatsächlich induzierte EMK durch die äquivalente sinusförmige verlaufende, (459). Die augenblickliche durch einen Winkel x bestimmte Lage der Windung kennzeichnet dann auch die Phase, in der sich die EMK befindet. Stellt man die doppelte Polteilung durch einen Kreis dar, so wird die augenblickliche Lage der Windung durch einen Punkt Q auf seinem Umfange, Abb. 225 und die zugehörige Phase der EMK durch die Strecke Qy gekennzeichnet, wenn die EMK in der Lage $x_1 x_2$ der Windung den Wert Null hat.

Werden die Leiter miteinander zu einer fortlaufenden Wicklung verbunden, so läßt das Diagramm noch eine andere Deutung zu. Durchläuft man nämlich die Wicklung bei einer bestimmten Lage des Ankers, indem man von dem in x_1 liegenden Stab ausgeht, so gelangt man von Stab zu Stab fortschreitend zu wechselnden Potentialen, die nach der topographischen Methode (vgl. ETZ 1898, S. 164; Z. f. El. 1899; ETZ 1901, S. 563) für die Stabenden einer Ankerseite durch dieselben Punkte des Kreises dargestellt werden können, durch die die jeweilige Lage des Stabes bestimmt wird. Denn die geometrische Addition aller Vektoren gleicher Länge, die um gleiche Winkel gegeneinander verdreht sind, ergibt ein regelmäßiges Polygon. Es stellt dann z. B. Punkt Q das Potential dar, das man nach Durchlaufen aller Stäbe von x_1 bis Q erreicht. Diese Darstellung ermöglicht es, in sehr einfacher Weise die Potentialdifferenz, d. h. die Spannung zwischen zwei beliebigen Stäben, zu finden; denn diese ist nach Größe und Phase einfach proportional der Länge der Sehne zwischen den der Lage der Stäbe entsprechenden Punkten.

Hieraus ergibt sich, daß man aus geschlossenen Wicklungen ohne weiteres Einphasenstrom, Zweiphasenstrom, Drehstrom und allgemein n-Phasenstrom entnehmen kann. Man macht hiervon besonders bei den (Einanker-)Umformern (555) Gebrauch.

(447) Aufgeschnittene Wicklungen. (Vgl. Ossanna, Über Schaltungen mit aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen. Z. f. E. 1899, S. 347.) Die geschlossenen Wicklungen lassen keine Hintereinanderschaltung von Wicklungsteilen mit EMKen gleicher Phase zu und ergeben auch ungünstige Drehstromwicklungen, da stets (Trommelwicklung vorausgesetzt) Drähte neben- oder übereinander liegen, die Ströme verschiedener Phase zu führen haben. Dies läßt sich durch Aufschneiden der Wicklung vermeiden, zugleich ist dann die Hintereinanderschaltung und die Sternschaltung möglich. Abb. 226 zeigt eine an zwei Schleifringe angeschlossene, aufgeschnittene Wicklung für Einphasenstrom mit zwei hintereinander geschalteten Teilen. Die geschlossene Wicklung gibt z. B., wenn die drei Punkte A, B und C an Schleifringe angeschlossen werden, Abb. 228, die Spannungen AB, BC und CA; wird sie aber sechsmal aufgeschnitten und nach Abb. 227 geschaltet, die drei Spannungen $(AD+CE)$, $(BE+AF)$, $(CF+BD)$. Die Leistungen der Maschine verhalten sich bei gleicher Stromstärke wie AB zu $(AD+CE)$. Die drei Zweige A_1E_1; A_2E_2 und A_3E_3 können nach Belieben in

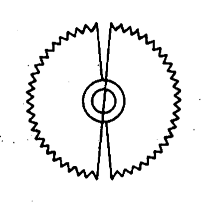


Abb. 226. Aufgeschnittene Einphasenwicklung.

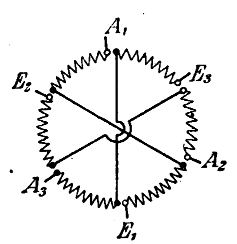


Abb. 227. Aufgeschnittene Dreiphasenwicklung.

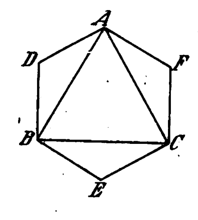


Abb. 228. Spannungsdiagramm der Drei- und der Sechsphasenwicklung.

Dreieck oder Stern geschaltet werden. Bei mehrpoligen Maschinen mit Reihenschaltung schneidet man die Wicklung ebenfalls an sechs Stellen auf (schleichende Wicklung); bei Parallelschaltung ist für jedes Polpaar eine Zerlegung in sechs Teile erforderlich, von denen die elektrisch gleichwertigen nach Belieben parallel oder hintereinander geschaltet werden können.

(448) Ankerrückwirkung. Die Ankerströme erzeugen bei Mehrphasenstrom ein Drehfeld, das synchron mit den Feldmagneten umläuft. Der Höchstwert der Anker-Durchflutung für zwei Pole schwankt bei Drehstrom (497) zwischen $^2/_3 \sqrt{2} \cdot m_a I$ und dem $^1/_2 \sqrt{3}$fachen hiervon. m_a ist die Windungszahl für ein Polpaar. Der Mittelwert hieraus ist $0{,}88\, m_a I_a$. Die entmagnetisierende Wirkung der Ankerströme hängt von der Phasenverschiebung $\vartheta = \varphi + \alpha$ (460) zwischen E_λ und I ab und ist am größten, wenn $\vartheta = 90°$. Dabei ist φ die Phasenverschiebung zwischen der Klemmenspannung P und dem Strom, α die Voreilung der EMK E_λ, die bei Leerlauf bei unveränderter Erregung auftritt, vor der Klemmenspannung. Bei $\vartheta = 0°$, ein Fall, der im allgemeinen nur bei einer Phasenvoreilung, also bei negativem φ auftritt, wirken die Ankerströme auf der voreilenden Hälfte des Poles schwächend, auf der anderen verstärkend, Abb. 229 (Quermagnetisierung). Nur bei geringer Sättigung in den Zähnen wird dann auch die Induktion in demselben Maße geändert, der gesamte Induktionsfluß bleibt in diesem Falle unverändert. Es ändert sich jedoch der zeitliche Verlauf der EMK und ihr Mittelwert. Bei größe-

rer Sättigung überwiegt die Abschwächung. Ebenso überwiegt die Abschwächung, wenn I eine nacheilende Phasenverschiebung gegen P besitzt. In Abb. 229 sind die Feldstärken unter der Annahme aufgetragen, daß die Sättigung gering ist. Man hat dann für einen Pol

$$\mathfrak{H}_f = \frac{0{,}4\pi \cdot m_f I_f}{2\delta} = 0{,}628 \frac{m_f I_f}{\delta} \quad \text{und} \quad \mathfrak{H}_{a\,max} = \frac{0{,}4\pi \cdot 0{,}88\, m_a I_a}{2\delta} = 0{,}55 \frac{m_a I_a}{\delta}$$

und für den gesamten Induktionsfluß eines Poles

$$\Phi_{Luft} = \beta l \cdot \mathfrak{H}_f \cdot \left[1 - \frac{\mathfrak{H}_{a\,max}}{\mathfrak{H}_f} \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2\tau}\pi}{\frac{\beta}{2\tau}\pi} \cdot \sin\vartheta \right],$$

m_a und m_f sind die Windungen für ein Polpaar auf dem Anker und auf den Feldmagneten, β der Polschuhbogen in cm, l die axiale Länge des Polschuhes in cm, δ die Dicke des Luftspaltes in cm, τ die Polteilung in cm.

Bei stärkerer Sättigung kann man diese Abbildung als erste Annäherung für die Verteilung des Induktionsflusses ansehen. Zu einer genaueren Bestimmung hat man nunmehr die Induktion der einzelnen Induktionsröhren in der Luft nach dem Hopkinsonschen Verfahren zu bestimmen (vgl. 382).

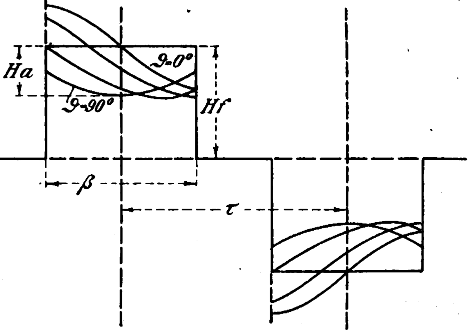


Abb. 229. Diagramm der Ankerrückwirkung.

(449) Das Ankerfeld bei Einphasenstrom ist pulsierend. Man kann es in zwei gegensinnig mit gleicher Geschwindigkeit umlaufende Drehfelder von je der halben Stärke zerlegen. Das mit den Feldmagneten umlaufende Feld wirkt genau so wie vorher beschrieben. Das gegensinnig laufende Feld ruft Pulsationen im Magnetismus hervor, deren Frequenz doppelt so groß wie die des erzeugten Wechselstromes ist. Die Pulsationen werden durch die Erregerwicklung und durch massives Eisen der Feldmagnete gedämpft, sind aber noch so stark, daß sie an den Pulsationen des Erregerstromes erkannt werden können, und wirken auch auf die Kurvenform der EMK im Anker zurück, indem sie Oberschwingungen erzeugen. Ihr Einfluß auf den Effektivwert der EMK verschwindet bei geringer Sättigung, während bei stärkerer Sättigung wieder die Abschwächung überwiegt. Die Gesamtwirkung des Ankerstromes auf den Spannungsabfall ist dann nahezu ebenso groß wie in dem Falle, daß aus der Maschine Drehstrom von derselben Stärke entnommen wird. Ist der Erregerkreis offen, so ruft das Ankerfeld bei Drehstrom bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit, bei Einphasenstrom bei jeder Geschwindigkeit hohe Spannungen im Erregerkreise hervor, die schon bei sehr kleinen Maschinen eine lebensgefährliche Höhe erreichen und außerdem die Isolation stark gefährden.

(450) Die **Dämpfungswicklung** nach Leblanc dient dazu, die durch das gegenläufige Ankerfeld hervorgerufenen Pulsationen zu dämpfen. Sie besteht aus starken Kupferbolzen, die nahe der Peripherie parallel zur Welle durch die Pol-

schuhe gezogen und auf beiden Seiten entweder sämtlich oder, soweit sie einem und demselben Polschuh angehören, durch starke Kupferstücke gut leitend miteinander verbunden sind. Eine solche Dämpfungswicklung wirkt daher in dreifacher Hinsicht günstig: sie vermindert den Spannungsabfall bei Belastung, beseitigt die Oberschwingungen in der Kurve der EMK und verhütet endlich das Auftreten hoher Spannungen in dem Erregerkreise bei Kurzschlüssen des Ankerkreises, wie sie besonders heftig im Bahnbetriebe auftreten (vgl. Punga, ETZ 1906, S. 837). Pichelmayer (ETZ 1910, S. 161) schlägt vor, einen gleichmäßig bewickelten Zylinder mit einer in sich geschlossenen Wicklung als Feldmagnet zu nehmen. Der Erregerstrom wird durch Schleifringe an Stellen zugeführt, die um 2τ voneinander entfernt sind, während die mitten zwischen diesen liegenden Punkte durch einen Querkurzschluß miteinander verbunden werden.

(451) Vorausberechnung der Kurve und des effektiven Mittelwertes der EMK. Es gilt wieder wie in (408) für den Augenblickswert der EMK einer Windung

$$\varepsilon = (\mathfrak{B}_x - \mathfrak{B}_{x+b}) v l \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

$\mathfrak{B}_x$ und $\mathfrak{B}_{x+b}$ sind die Werte der magnetischen Induktion an den Stellen, wo sich augenblicklich die beiden Seiten der Windung befinden. Die Werte von $\mathfrak{B}$ sind z. B. aus einer Kurve der Verteilung der magnet. Induktion im Luftraum zu entnehmen. Ist die magnet. Induktion von Zahn zu Zahn bekannt, so kann man als Wert von $\mathfrak{B}$ für eine Nut den Mittelwert der magnet. Induktionen in den beiden sie einschließenden Zähnen ansehen. Haben m_1 Windungen immer die gleiche EMK ε_1, m_2 Windungen die gleiche EMK ε_2 usw., so ist der Augenblickswert der EMK aller in Reihe geschaltenen Windungen $e = m_1\varepsilon_1 + m_2\varepsilon_2 + m_3\varepsilon_3 + \cdots$ und der effektive Mittelwert

$$E = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2 \, dt}\,.$$

Hiernach kann man für jede Verteilung der magnet. Induktion und jede Verteilung der Windungen die EMK berechnen.

(452) Die EMK bei Leerlauf. Bei Leerlauf kann man $\mathfrak{B}$ über die ganze Polfläche als konstant ansehen. Sind alle Pole gleichmäßig erregt, so ist

$$\mathfrak{B}_{x+\tau} = -\mathfrak{B}_x$$

und für eine Windung einer langen Spule $(b = \tau)$ daher

$$\varepsilon = 2\,\mathfrak{B}_x v l \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Solange die Seiten der Windung unter den Polen liegen, hat die EMK den Wert

$$\varepsilon_0 = 2\,\mathfrak{B} v l \cdot 10^{-8} \text{ Volt,}$$

solange sie zwischen den Polen liegen, den Wert Null. Mit

$$\mathfrak{B} l = \frac{\Phi}{\beta}, \qquad v = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2\pi r f}{p}, \qquad \tau = \frac{\pi r}{p}$$

kann man auch schreiben

$$\varepsilon_0 = \frac{4 f \Phi}{\beta/\tau} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Bei gleichförmig verteilten Nuten kann man das Integral für E durch eine Summe ersetzen. Enthält z. B. eine Drehstromwicklung bei σ-fachen Nuten auf die Polteilung 3σ Nuten, so kann man

$$dt = \Delta t = \frac{T/2}{3\sigma} = \frac{T}{6\sigma}$$

und daher

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{6\sigma} \cdot \sum_0^T e^2} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \frac{T}{6\sigma} \cdot \sum_0^{T/2} e^2} = \sqrt{\frac{1}{3\sigma} \cdot \sum_0^{T/2} e^2}$$

setzen. Liegen in allen Nuten gleich viel Drähte, so ist $m_1 = m_2 = \cdots = m_\sigma = m_z/\sigma$, wenn m_z die Windungszahl eines Zweiges für ein Polpaar ist. Daher wird für einen Zweig A

$$e_\triangle = \frac{m_z}{\sigma} \varepsilon_1 + \frac{m_z}{\sigma} \varepsilon_2 + \cdots + \frac{m_z}{\sigma} \varepsilon_\sigma = \frac{m_z}{\sigma} \cdot \Sigma \varepsilon_a .$$

Sind zwei Zweige A und B in Stern geschaltet, so ist

$$e_Y = \frac{m_z}{\sigma} \cdot (\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b) .$$

Daher werden die effektiven Mittelwerte

$$E_\triangle = \frac{m_z}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{1}{3\sigma} \Sigma (\Sigma \varepsilon_a)^2} \quad \text{und} \quad E_Y = \frac{m_z}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{1}{3\sigma} \Sigma (\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)^2} .$$

Bei Zweiphasenstrom hat man 2σ für 3σ zu setzen.

(453) Beispiel. Drehstromwicklung, lange Spulen, 12 Nuten auf ein Polpaar, also $\sigma = 2$, $\beta/\tau = 2/3$, Abb. 230.

$\frac{t_1 - t_2}{T}$	$\frac{\varepsilon_{a1}}{\varepsilon_0}$	$\frac{\varepsilon_{a2}}{\varepsilon_0}$	$\frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_0}$	$\frac{\varepsilon_{b2}}{\varepsilon_0}$	$\frac{\Sigma \varepsilon_a}{\varepsilon_0}$	$\frac{(\Sigma \varepsilon_a)^2}{\varepsilon_0^2}$	$\frac{\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b}{\varepsilon_0}$	$\frac{(\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)^2}{\varepsilon_0^2}$
0 – 1/12	1	0	0	1	1	1	0	0
1/12 – 2/12	1	1	0	0	2	4	2	4
2/12 – 3/12	1	1	– 1	0	2	4	3	9
3/12 – 4/12	1	1	– 1	– 1	2	4	4	16
4/12 – 5/12	0	1	– 1	– 1	1	1	3	9
5/12 – 6/12	0	0	– 1	– 1	0	0	2	4
					$\Sigma(\Sigma \varepsilon_a)^2 = 14\,\varepsilon_0^2$		$\Sigma(\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)^2 = 42\,\varepsilon_0^2$	

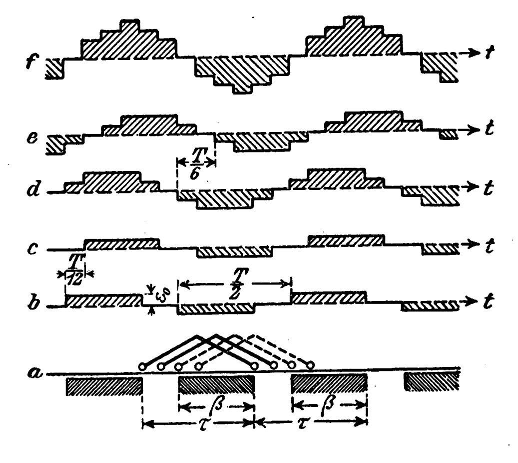


Abb. 230 a zeigt einen Teil einer Drehstromwicklung bei zweifachen Nuten ($\sigma = 2$). Abb. 230b und c stellen die EMK in den benachbarten beiden Windungen des Zweiges A, 230d ihre Summe e_a bei Reihenschaltung dar. Abb. 230e ist die negative EMK — e_b des Zweiges B. Sie ist um 60° gegen die Kurve d verschoben. Die resultierende EMK bei Sternschaltung erhält man, indem man die Summe von e_a und — e_b bildet, Abb. 230f.

Daher

$$E_\Delta = \frac{m_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{14}{6} \varepsilon_0^2} = \frac{m_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{14}{6}} \cdot \frac{4 f \Phi}{2/3} \cdot 10^{-8} = 4{,}59 \cdot f m_z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$E_\curlyvee = \frac{m_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{42}{6} \varepsilon_0^2} = \frac{m_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{42}{6}} \cdot \frac{4 f \Phi}{2/3} \cdot 10^{-8} = 7{,}95 \cdot f m_z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Man findet noch $E_\curlyvee / E_\Delta = \sqrt{42/14} = \sqrt{3}$.

(454) Glatte Anker. Wenn σ sehr groß ist, oder wenn die Wicklung auf einem glatten Anker gleichmäßig verteilt liegt, ist die EMK einer Spule konstant gleich ihrem größten Wert E_0, solange alle Drähte der einen Spulenseite unter einem, alle Drähte der anderen Spulenseite unter einem anderen Pole liegen, oder solange überall unter einem Pole Drähte einer Spulenseite liegen. Zwischen dem Maximum und Minimum kann man den Verlauf der EMK als linear annehmen. Dann ist

a) wenn $\beta \geq b$ ist, so daß alle m_z Windungen der Spule dieselbe EMK ε_0 enthalten,

$$E_0 = m_z \cdot \varepsilon_0 = m_z \frac{4 f \Phi}{\beta/\tau} 10^{-8} \text{ Volt},$$

b) wenn $\beta < b$ ist, so daß gleichzeitig nur in $\frac{\beta}{b} m_z$ Windungen die EMK den Wert ε_0 haben kann,

$$E_0 = \frac{\beta}{b} m_z \cdot \varepsilon_0 = m_z \frac{4 f \Phi}{b/\tau} 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Aus dem Maximalwert kann man, da die Kurve der EMK ein gebrochener, aus geraden Strecken zusammengesetzter Linienzug ist, die Effektivwerte der EMK E_Δ für Dreieck- und $E_\curlyvee$ für Sternschaltung durch Integration finden.

(455) Beispiel. Drehstromwicklung. $\beta/\tau = 2/3$, Sternschaltung, Abb. 231.

1. Von 0 bis $T/12$ ist $e = a t$. Für $t = T/12$ ist $e = E_0$, daher

$$e = \frac{12 E_0}{T} t.$$

2. Von $T/12$ bis $3T/12$ ist $e = a_0 + a_1 t$. Verschiebt man den Nullpunkt des Koordinatensystems um $T/12$ nach links, so kann man

$$e = a_2 t'$$

schreiben. Als Grenzen sind dann $T/6$ und $2\,T/6$ zu nehmen. Für $t = T/6$ ist $e = E_0$, daher

$$e = \frac{6 E_0}{T} \cdot t'.$$

Man erhält daher für den Effektivwert

$$E_\curlyvee^2 = \frac{1}{T/4} \cdot \left[\int_0^{\frac{T}{12}} \left(\frac{12 E_0}{T}\right)^2 t^2 \mathrm{d}t + \int_{\frac{T}{6}}^{\frac{2T}{6}} \left(\frac{6 E_0}{T}\right)^2 t'^2 \mathrm{d}t' \right]$$

$$= \frac{4}{T} \left[\left(\frac{12 E_0}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{3} \left(\frac{T}{12}\right)^3 + \left(\frac{6 E_0}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{3} \left(\frac{2^3}{6^3} - \frac{1}{6^3}\right) T^3 \right] = \frac{5}{3} E_0^2.$$

Daher wird

$$E_\curlyvee = \sqrt{\frac{5}{3}} \cdot E_0 = 1{,}291 \cdot \frac{4 f \Phi}{2/3} m_z \cdot 10^{-8} = 7{,}75 \cdot f m_z \Phi 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Man kann daher allgemein

$$E = k \cdot f\, m_z\, \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

setzen, worin unter m_z die Windungszahl eines Zweiges für ein Polpaar, unter Φ der von einem Pol herrührende Induktionsfluß im Anker zu verstehen ist.

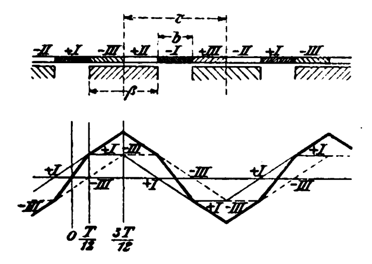


Abb. 231. Elektromotorische Kraft einer Drehstromwicklung bei glattem Anker.

Wird statt mit Windungen mit am Anker liegenden „Leitern" gerechnet, so ist für k nur der halbe Wert einzusetzen. Die Konstante k hängt vom Verhältnis Polbogen : Teilung und von der Nutenzahl ab; sie wird, da sie in erster Linie aus den Kappschen Lehrbüchern bekannt ist, häufig die „Kappsche Konstante" genannt. Die einzelnen Werte von k können den folgenden Tabellen entnommen werden.

Nutenanker.

Nutenzahl für je ein Polpaar	σ	$\frac{\beta}{\tau}=\frac{1}{2}$			$\frac{\beta}{\tau}=\frac{2}{3}$			$\frac{\beta}{\tau}=\frac{5}{6}$		
		k_Δ	k_Y	$\frac{k_Y}{k_\Delta}$	k_Δ	k_Y	$\frac{k_Y}{k_\Delta}$	k_Δ	k_Y	$\frac{k_Y}{k_\Delta}$
6	1	5,65	9,22	1,63	4,90	8,49	1,73	4,39	8,08	1,84
12	2	5,16	8,64	1,67	4,59	7,95	1,73	4,16	7,07	1,70
18	3	5,07	8,53	1,68	4,53	7,84	1,73	4,08	6,96	1,71
24	4	5,03	8,50	1,69	4,50	7,80	1,73	4,07	6,95	1,71
30	5	5,01	8,47	1,69	4,49	7,77	1,73	4,05	6,93	1,71

Glatter Anker.

Phasenwicklung und aufgeschnittene Wicklung	4,99	8,45	1,69	4,47	7,75	1,73	4,04	6,91	1,71
Geschlossene Wicklung	4,22	—	—	3,88	—	—	3,46	—	—

σ gibt an, wievielfache Nuten gewählt werden. k_Δ ist die Konstante für Dreieck-, k_Y die Konstante für Sternschaltung. Für andere Werte von β/τ kann hieraus k leicht interpoliert werden. Vgl. Sengel, ETZ 1907, S. 1188.

Vielfach werden mit Rücksicht auf Geräuschlosigkeit und weiche Form der Spannungskurve die Polschuhkanten abgeschrägt oder verrundet. Bei Ableitung der EMK-Kurven kann man die Abrundungen durch Einführung entsprechender magnet. Induktion berücksichtigen, indem man annimmt, daß diese stets der radialen Tiefe des Luftraumes umgekehrt proportional ist.

(456) Erregung. Die Feldmagnete der synchronen Wechselstrommaschinen werden von einer besonderen Gleichstromquelle her erregt. Der Erregerstrom wird entweder einer vorhandenen Gleichstromquelle von konstanter Spannung entnommen und der Schenkelwicklung der Wechselstrommaschine unter Vorschaltung eines Regulierwiderstandes zugeführt, oder in einer besonderen Erregermaschine erzeugt. Die Erregermaschine kann mit der Hauptmaschine unmittelbar gekuppelt werden, fällt dann aber namentlich bei großen Maschinen mit Kolbenmaschinenantrieb infolge der geringen Drehzahl teuer aus und ist zugleich mit der Hauptmaschine allen störenden Einflüssen der Geschwindigkeitsschwankungen der Antriebsmaschine ausgesetzt, so daß diese Einflüsse sich in der Wirkung auf die Spannung der Hauptmaschine potenzieren. Bei Turbodynamos ist die direkte Kuppelung der Erregermaschine mit der Hauptmaschine allgemein gebräuchlich. In vielen Fällen wird die Erregermaschine dauernd oder gelegentlich in Parallelschaltung mit einer Akkumulatorenbatterie betrieben. Werden die Erregermaschinen von Wechselstrommotoren angetrieben, die von den Hauptmaschinen gespeist werden, so muß eine Akkumulatorenbatterie vorgesehen werden, um die ganze Anlage nach einer Betriebseinstellung wieder in Gang setzen zu können. Um sie zum erstenmal in Betrieb zu setzen, ist dann eine fremde Maschine oder Stromquelle erforderlich.

Die Erregermaschinen selbst können als Nebenschlußmaschinen oder als Reihenschlußmaschinen ausgeführt werden. Im ersteren Falle braucht man in der Regel, um stabilen Gang der Erregermaschine zu sichern, zwei Regulierwiderstände, nämlich einen im Nebenschlußkreis des Erregers und einen im Erregerkreis der Wechselstrommaschine.

(457) Die **Regulierwiderstände** müssen eine genügende Anzahl Stufen erhalten. Ihre Gesamtgröße richtet sich nach den Bedingungen, die man aus der Belastungscharakteristik ableitet (464), wobei es sich empfiehlt, eine Sicherheit von etwa 25% einzuschließen. Bei Nebenschlußerregermaschinen werden die Stufen zweckmäßig gleich groß gemacht. Ist die Erregerdynamo eine Reihenschlußmaschine, so darf der Regulierwiderstand nicht in gleiche Stufen geteilt werden, er muß vielmehr unter Benutzung der Maschinencharakteristik so geteilt werden, daß jeder Stufe eine gleich große Zunahme der Stromstärke entspricht (412).

Die Kontakte der Regulierwiderstände sollten während des Betriebes unzugänglich sein, besonders wenn an der Schalttafel kein isolierender Bedienungsgang vorgesehen ist.

(458) Die **Ausschaltung** eines Erregerkreises bedingt große Vorsicht, weil infolge der großen Selbstinduktion der Wicklung bei plötzlichem Öffnen des Stromkreises sehr große Überspannungen entstehen können. Man hat daher vor dem Ausschalten die Stromstärke mit Hilfe des Regulierwiderstandes möglichst zu erniedrigen und dann entweder unter Benutzung eines Kurzschlußkontaktes (417) oder mit Hilfe eines lichtbogenziehenden Ausschalters zu unterbrechen. Direkt gekuppelte Erreger brauchen, sofern sie lediglich auf den zugehörigen Generator geschaltet sind, in der Regel überhaupt nicht ausgeschaltet zu werden; man macht sie durch Abstellen der Antriebsmaschine stromlos. Als Reihenschlußmaschinen ausgeführte Erreger können dadurch stromlos gemacht werden, daß man ihre Schenkelwicklung kurz schließt.

(459) Sinusförmiger und nichtsinusförmiger Strom. Aus vielen Gründen wäre es das Vorteilhafteste, wenn die Stromerzeuger EMKe lieferten, die nach einem einfachen Sinusgesetz verliefen, also die Form

$$e = E_0 \sin 2\pi f t = E_0 \sin \omega t$$

besäßen. Dies ist daher auf jede Weise anzustreben, gelingt aber nur bis zu einem bestimmten Grade. Im allgemeinen kann man die EMK nur durch eine unendliche trigonometrische Reihe von der Form



$$f(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \cdots$$
$$+ B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + B_3 \cos 3\omega t + \cdots$$
$$= E_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + E_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + E_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \cdots$$

darstellen, worin

$$E_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}, \quad E_2 = \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \quad \text{usw. ist.}$$

Man nennt die EMK „sinusförmig", wenn nur das erste Glied mit der Amplitude E_1 vorhanden ist, im anderen Falle nichtsinusförmig. Das erste Glied ist die Grundschwingung, die folgenden sind die Oberschwingungen.

Zeichnet man sich die einzelnen Sinus- und ebenso die einzelnen Cosinus-Glieder auf, so erkennt man ohne weiteres unter anderen die folgenden beiden Sätze:

1. Addiert man je zwei Werte, die zu den Abszissen ωt und $\omega t + \pi$ gehören, so fallen alle ungeraden Glieder heraus, während die geraden verdoppelt werden. Geometrisch hat man die zweite Hälfte der Kurve über der Periode um π nach links zu schieben und sie zu der ersten Hälfte zu addieren.

Sind nun bei einer Wechselstrommaschine alle Pole gleich ausgebildet und gleich stark erregt, so verläuft die negative Hälfte der Kurve genau so wie die positive, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Die beschriebene Maßnahme ergibt daher überall den Wert Null. Die zugehörige Reihe kann demnach keine geraden Glieder erhalten.

2. Subtrahiert man je zwei Werte, die zu den Abszissen ωt und $(\omega t + 2\pi/3)$ gehören, voneinander, so fallen alle Glieder, deren Ordnungszahl durch 3 teilbar ist, heraus.

Dies ist bei der Sternschaltung der Drehstrommaschinen der Fall.

Bei der üblichen Bauart der Wechselstrommaschinen kann die Kurve der EMK daher nur Oberschwingungen von ungerader Ordnungszahl enthalten; bei Drehstrommaschinen in Sternschaltung fallen außerdem alle Oberschwingungen heraus, deren Ordnungszahl durch 3 teilbar ist.

Bei Leerlauf läßt sich die EMK der normalen Wechselstrommaschinen durch eine Sinus- oder eine Kosinusreihe allein darstellen, bei Belastung wird die Kurve durch die Ankerrückwirkung verzerrt, die EMK enthält daher gleichzeitig die Sinus- und die Kosinusglieder.

Der effektive Mittelwert der sinusförmigen EMK ist $E_{eff} = E_1/\sqrt{2}$, der der nichtsinusförmigen EMK

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2 + E_3^2) + \cdots}.$$

Über die Berechnung der Amplituden A und B sowie über die Aufnahme der Wechselstromkurven siehe Runge, Theorie und Praxis der Reihen. Sammlung Schubert, XXXII, Göschensche Verlagsbuchhandlung Leipzig. — Orlich, Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. Braunschweig 1906 — vgl. (107) und (216).

Oberschwingungen entstehen durch die Treppenform der Kurve der EMK und durch periodische Schwankungen im Widerstande des magnetischen Kreises infolge der Nutung. Zur Abhilfe vergrößert man den Abstand der Polfläche von der Ankerfläche allmählich nach den Polkanten hin oder stellt die Polkanten oder die Nuten schräg mit einer Steigung gleich der Nutenteilung auf die Ankerlänge. Die tatsächlich vorhandenen Kurven der Spannung und der Stromstärke werden vielfach durch äquivalente Sinuskurven ersetzt, deren Amplituden und deren Phasenverschiebung gegeneinander so gewählt werden müssen, daß sie dieselben effektiven Mittelwerte haben und dieselbe mittlere Leistung ergeben, wie die wahren Kurven,

(460) Das Diagramm der Wechselstrommaschine gibt qualitativ einen guten Einblick in die Vorgänge bei Belastung. Die umlaufenden, durch Gleichstrom erregten Feldmagnete werden durch einen ruhenden, mit Mehrphasenstrom erregten Ring ersetzt gedacht, der dieselbe Nutenzahl und dieselbe Windungszahl besitzt wie der Anker. Wir können dann das Transformatordiagramm (331) anwenden. Alle Magnetismen sind durch die EMKe zu messen, die sie im Anker bei Leerlauf erzeugen würden, wenn sie einzeln für sich allein vorhanden wären.

Der wirksame Induktionsfluß (Abb. 232) im Anker $\Phi_a = OA$ erzeugt die um 90° gegen ihn verschobene EMK $E = OA_1$, die Klemmenspannung $P = OK$ ist die geometrische Differenz von E und $I_a R_a$. Die Magnetisierung des Ankereisens erfordert die MMK H_a, die wegen der Wirbelströme und der Hysterese eine gewisse Voreilung vor Φ_a hat. Die für die Ankerstreuung in Rechnung zu ziehende magnetische Potentialdifferenz Π_a ist die geometrische Summe von H_a und $-0{,}4\pi\Delta_a$. Die Ankerstreuung $\Phi_s = AB$ kann proportional und phasengleich mit Π_a angenommen werden. Wenn $\mathfrak{R}_s$ der Widerstand des Ankerstreuflusses ist, so ist $\Phi_s = \Pi_a/\mathfrak{R}_s$. Der die Luft durchsetzende Magnetismus $\Phi_L = OB$ ist die geometrische Summe von Φ_a und Φ_s. Um Φ_L durch die Luft zu treiben, ist die MMK H_L erforderlich, proportional und phasengleich mit Φ_L. Man hat daher $H_L = \mathfrak{R}_L \Phi_L$, wenn $\mathfrak{R}_L$ der Widerstand des Luftweges ist. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen den Polen der Feldmagnete ist $\Pi_f = \Pi_a + H_L$. Diese erzeugt die Feldstreuung, um die die Feldmagnete stärker als bei Leerlauf belastet sind (448). Um den gesamten Induktionsfluß durch die Feldmagnete zu treiben, ist noch die MMK H_f erforderlich. Die Summe von Π_f und H_f, nämlich OD, ist der Durchflutung der Feldmagnete proportional.

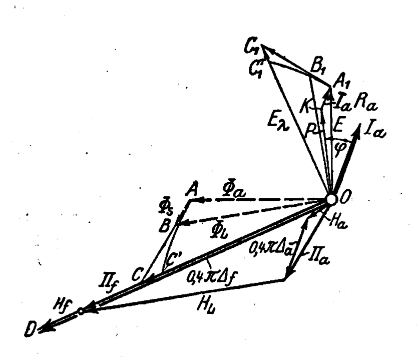


Abb. 232. Vektordiagramm des Wechselstromerzeugers.

(461) Leerlauf. Läßt man die Erregung konstant und verringert man I_a allmählich bis auf Null, so wird der Ankerstreufluß sehr klein, A und B fallen nahezu mit C zusammen. AB wird gleich Null und OA fällt vollkommen mit OC zusammen, wenn man H_a und H_f vernachlässigt, d. h. bei geringer Eisensättigung. Bei Leerlauf würde dann der Ankerfluß gleich OC und die EMK gleich OC_1 ($\perp OC$) sein. Die AB entsprechende EMK A_1B_1 heißt die EMK der Ankerstreuung, die BC entsprechende EMK B_1C_1 heißt die der Ankerrückwirkung entsprechende EMK. OC_1 ist die EMK bei Leerlauf E_λ. Starke Sättigung der Feldmagnete, d. h. relativ großer Wert von H_f, verhindert bei Entlastung ein allzu starkes Anwachsen der EMK; in diesem Falle bewegt sich A nicht nach C, sondern etwa nach C'. Man hat hierin ein Mittel, die Spannungsschwankungen bei veränderlicher Belastung in geringeren Grenzen zu halten, beraubt sich dadurch aber der Möglichkeit, die Spannung — etwa zur Deckung größerer Spannungsverluste bei starker Belastung — genügend zu erhöhen, und läuft überhaupt Gefahr, daß die Spannung nicht in allen Fällen aufrecht erhalten werden kann. Ankerstreufluß und Ankerrückwirkung ergeben zusammen die „Selbstinduktivität" des Ankers. A_1C_1 ist demnach die durch (die gesamte) Selbstinduktion hervorgerufene EMK des Ankers. Der Voreilungswinkel $C_1'OA_1$ wird durch die Eisensättigung nicht beeinflußt.

(462) Diagramm der EMK. Trägt man (Abb. 232) die Klemmenspannung $P = OK$ senkrecht nach oben auf, so ist die tatsächlich in der Maschine vorhandene EMK $E = OA_1$ gleich der geometrischen Summe von P und $I_a R_a = KA_1$. Dieselbe

Erregung würde aber bei Leerlauf eine EMK $E_\lambda = OC_1$ erzeugen, die sich von E um A_1C_1 unterscheidet. A_1C_1 ist die EMK der Selbstinduktion. Bei schwacher Sättigung der Feldmagnete steht A_1C_1 senkrecht auf dem Vektor der Stromstärke, also auch senkrecht auf KA_1. Bei wachsender Stromstärke und konstanter Spannung bewegt sich der Endpunkt des Vektors E_λ auf der Geraden A_1C_1, bei stärkerer Sättigung dagegen auf einer konkav nach unten gekrümmten Linie A_1C_1'.

(463) Spannungsabfall durch Belastung. Die Klemmenspannung der unbelasteten Maschine sei gleich $E_\lambda = OC_1'$. Dann sinkt bei konstanter Erregung die Klemmenspannung bei Belastung auf den Betrag OK. Man nennt KA_1 den Ohmschen, A_1C_1' den induktiven Spannungsverlust. Der Spannungsverlust ist durch die algebraische Differenz zwischen OC_1' und OK gegeben. Diese ist bei konstanter Stromstärke um so größer, je größer der Winkel φ der Phasenverschiebung zwischen Klemmenspannung und Stromstärke ist.

(464) Charakteristiken der Wechselstrommaschinen nennt man Kurven in einem rechtwinkligen Koordinatensystem, die über ihr Verhalten Aufschluß geben. Man unterscheidet die Leerlauf-, die Kurzschluß- und die Belastungscharakteristik. Bei der Aufnahme wird die Drehzahl konstant gehalten.

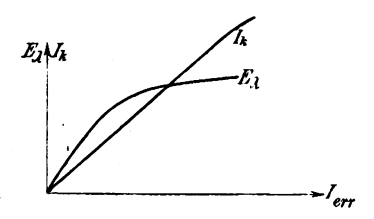


Abb. 233. Leerlauf- und Kurzschlußcharakteristik des Wechselstromgenerators.

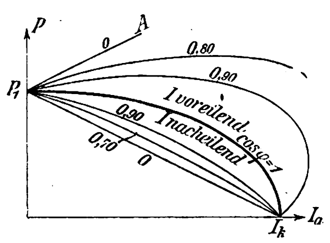


Abb. 234. Belastungscharakteristiken des Wechselstromgenerators.

Die L e e r l a u f c h a r a k t e r i s t i k, auch statische Charakteristik (Abb. 233), stellt die Abhängigkeit der EMK bei Leerlauf E_λ von der Erregung I_{err} bei konstanter Drehzahl dar. Sie hat die Form der Magnetisierungskurve und liegt, wenn sie bei steigenden Werten aufgenommen wird, wegen der Remanenz etwas tiefer, als wenn sie bei fallenden Werten aufgenommen wird (Abb. 198). Man wählt häufig eine mittlere, durch den Nullpunkt gehende Kurve.

Die K u r z s c h l u ß c h a r a k t e r i s t i k (Abb. 233) stellt die Abhängigkeit der Stromstärke I_k im kurzgeschlossenen Anker von der Erregung I_{err} dar. Sie verläuft wegen der geringen Eisensättigung vom Nullpunkt ausgehend sehr lange geradlinig und biegt erst bei weit über normaler Ankerstromstärke nach rechts um. Bei der Aufnahme dieser Kurve braucht die Drehzahl nicht konstant zu sein.

Die B e l a s t u n g s c h a r a k t e r i s t i k, auch dynamische Charakteristik genannt (Abb. 234), stellt die Abhängigkeit der Klemmenspannung P von der Ankerstromstärke I_a dar, wenn Drehzahl, Erregung und Leistungsfaktor konstant gehalten werden.

Sie läßt sich aus dem Vektordiagramm, Abb. 232, ableiten. Man erhält für jeden $\cos\varphi$ eine besondere Kurve. Bei $\cos\varphi = 1$ ist sie angenähert eine Ellipse, deren Achsen mit den Koordinatenachsen zusammenfallen. Bei $\cos\varphi = 0$ geht sie in eine gerade Linie über, und zwar bei nacheilender Phasenverschiebung von 90° in die Gerade P_1I_k, bei voreilender in die Gerade P_1A. Bei voreilender Phasenverschiebung steigt die Spannung zunächst, bei nacheilender sinkt sie gleich bedeutend stärker als bei $\cos\varphi = 1$.

Um die Spannung konstant zu halten, muß man den Erregerstrom stark ändern können, etwa innerhalb der Grenzen von 50 bis 100% des größten Wertes.

(465) Selbsterregung und Zusatzerregung (Kompoundierung) der Wechselstrommaschinen ist wiederholt versucht worden, vgl. z. B. Heyland, ETZ 1903, S. 844 u. 1036.

Bei der Zusatzerregung von Danielson (ETZ 1899, S. 38) erhält der Anker der mit der Hauptmaschine gekuppelten Erregermaschine neben der Gleichstromwicklung noch eine an drei Schleifringe angeschlossene Wechselstromwicklung, die in Reihe mit der aufgelösten Ankerwicklung der Hauptmaschine geschaltet wird. Bei richtiger Stellung der Anker beider Maschinen zueinander wird die EMK der Erregermaschine durch den Strom der Hauptmaschine bei Phasennacheilung verstärkt, bei Phasenvoreilung abgeschwächt.

In Anlehnung an diese und eine von Rice angegebene Anordnung sind die von den Siemens-Schuckertwerken gebauten Wechselstromgeneratoren *HD* der Hamburger Vorortbahn, Abb. 235, mit einem Erreger *E* und einem Umformer *U* direkt gekuppelt. Der letztere verwandelt den von einem primär in den Stromkreis der Hauptmaschine geschalteten Stromtransformator *T* gelieferten Wechselstrom in Gleichstrom, der die Erregerwicklung *A* des Erregers speist. Dieser ist mit Wendepolen (Wicklung *B*) ausgestattet. Der Umformer wird von einer Akkumulatorenbatterie erregt (ETZ 1909, S. 1145 und 1195).

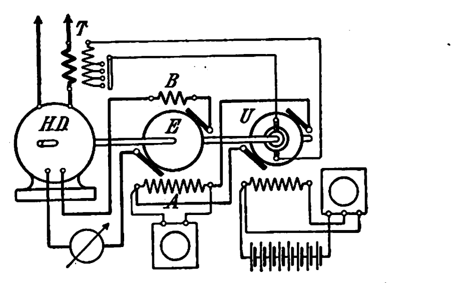
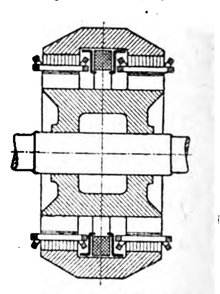


Abb. 235. Kompoundierungsschaltung eines Wechselstromgenerators.


Abb. 236. Gleichpoltyp.

(466) Kurzschluß der Ankerwicklung. Infolge von Störungen tritt auch an Drehstrommaschinen meistens nur ein Kurzschluß zwischen zwei Leitern oder Klemmen auf. Im Dauerzustande lagert sich dann über den Erregerstrom infolge der Ankerrückwirkung ein Wechselstrom von der doppelten Frequenz der Grundschwingung des Ankerstromes. Dieser ruft im Anker eine Oberschwingung von der dreifachen Frequenz hervor usw., so daß sich in der Erregerwicklung ein nicht sinusförmiger Strom von der 2-, 4-, 6-usw. fachen Frequenz der Grundschwingung des Ankerstroms, im Anker Oberschwingungen von der 3-, 5-, 7-usw. fachen Frequenz ausbilden. Beim Eintritt eines einphasigen Kurzschlusses treten in dem dritten Wicklungszweige einer in Stern geschalteten Wechselstrommaschine Spannungserhöhungen von dem Mehrfachen der normalen Spannung auf, die infolge von Dämpfung nach Verlauf einiger Perioden der Grundschwingung ziemlich abgeklungen sind. Erregerstrom und Ankerstrom nehmen Höchstwerte an, die das 10- bis 12-fache des normalen Vollaststromes betragen und ebenfalls nach einigen Perioden bis auf den Dauerkurzschlußstrom abklingen. Mittel zur Verringerung der Überspannungen und Überströme sind Dämpfungswicklungen (474), große Nutenstreuung und in die Ankerkreise eingeschaltete Drosselspulen. Die mechanische Beanspruchung der Maschinenteile und besonders der Wickelköpfe ist bei plötzlichen Kurzschlüssen sehr groß. Vgl. Weidig, Die Wechselstrominduktionsmaschinen mit einachsiger Wicklung, Diss. Dresden 1912. — Biermanns, ETZ 1916, S. 319, 579, 592. — Arch. El. Bd. 3, S. 354.

(467) Hochfrequenzmaschinen. — Für die drahtlose Telegraphie sind Wechselströme hoher Leistung für Frequenzen von 30000 bis 100000 Per/s erforderlich.

Man baut die Maschinen dazu mit einer Grundfrequenz von 5000 bis 10 000 Per/s. nach dem Gleichpoltyp, Abb. 236, der für Maschinen niedriger Frequenz veraltet ist. Ein Läufer trägt zwei Polkränze, die von einer großen feststehenden Spule erregt werden. Der eine Polkranz besitzt nur Nord-, der andere nur Südpole, die soweit voneinander abstehen, wie wenn die dazwischenliegenden entgegengesetzten Pole entfernt worden wären. Die Polkränze drehen sich innerhalb zweier mit Wicklungen versehener Anker, die durch einen großen sie umfassenden Zylinder aus massivem Eisen magnetisch miteinander verbunden sind. In den Ankerspulen wechselt der Induktionsfluß daher nicht, wie bei dem normalen Wechselpoltyp zwischen gleich großen positiven und negativen Höchstwerten, sondern zwischen einem Höchstwert und einem geringsten Wert, der wegen der Streuung nicht völlig zu Null wird. Wegen der großen Polzahl besitzen die Anker nur zwei Nuten auf ein Polpaar, die Polkränze nur einen Zahn und eine breitere Nut auf ein Polpaar. Die Wicklung liegt mäanderbandartig in den Nuten. Eine Maschine der Großstation Nauen besizt bei 130 m/s Umfangsgeschwindigkeit, 1500 U/Min und 6000 Per/s einen Läuferdurchmesser von 1,65 m, eine Nutenteilung von 10,8 mm und eine Teilung von Mitte Nordpol bis Mitte Nordpol von 21,6 mm. Sie liefert 1200 A bei 450 V. Der Anker ist mit Kühlschlangen versehen. Von der AEG ist eine Maschine für 30 000 Per/s, 40 kW gebaut worden und in der Station Deutsch-Altenburg bei Wien in Betrieb. Zur Erhöhung der Frequenz dienen mit Gleichstrom gesättigte Frequenztransformatoren (343).

Man kann auch nach R. Goldschmidt (ETZ 1911, S. 54) einen nach Art der Induktionsmotoren gebauten Generator verwenden, den einen Teil mit Gleichstrom erregen, wobei die Gleichstromquelle durch eine vorgeschaltete Drosselspule vor dem Eindringen von Wechselströmen geschützt wird, und durch Resonanz bestimmte Oberschwingungen herausheben, deren Entstehung in (466) beschrieben ist. Erregt man den Ständer mit Gleichstrom, so wird im Läufer eine der Umlaufzahl proportionale Frequenz f erzeugt. Wird der Läufer durch die Reihenschaltung einer Drosselspule und eines Kondensators geschlossen, so daß bei der Frequenz f Resonanz besteht, so wirkt dieser Schließungskreis wie ein Kurzschluß für die Schwingung mit der Frequenz f. Im Ständer entstehen daher Ströme von der Frequenz $2f$, die wieder durch einen Resonanzkreis als Kurzschlußströme wirken und im Läufer Ströme von der Frequenz $3f$ erzeugen. Man kann in dieser Weise fortfahren und beliebig hohe Frequenzen herstellen, von denen nur die letzte benutzt wird. Die verschiedenen Schließungskreise des Läufers sind einander parallel geschaltet, ebenso wie die des Ständers. Sie stören einander nicht, weil sie auf verschiedene Frequenzen abgestimmt sind. Dies System ist von C. Lorenz A.-G. Berlin ausgebildet worden und auf der Großstation Eilvese in Betrieb.

Parallelbetrieb der Wechselstrommaschinen[1]).

(468) Allgemeine Bedingungen. Zum Parallelbetrieb ist erforderlich, daß die Maschinen gleiche Frequenz, gleiche Spannung und annähernd gleiche Kurven der EMK haben. Parallel geschaltet müssen die Maschinen „synchron" laufen. Dies schließt in sich, daß gleiche Maschinen gleich schnell, verschiedenpolige Maschinen

[1]) Literatur: Kapp, ETZ 1899, S. 134. — Görges, ETZ 1900, S. 188; 1903, S. 561 (Vortrag) Physik. Zeitschr. 1909, S. 256 (n Masch.). — Görges u. Weidig, ETZ 1910, S. 332 (Versuche). — Rosenberg, ETZ 1902, S. 425 (graph. Theorie) 1903, S. 857 (Dämpfung). — Föppl, ETZ 1902, S. 59 (Regulatorschwingungen). — Sommerfeld, ETZ 1904, S. 273. — Emde, El. u. Maschb. 1907, S. 721 und 1909, S. 1073 (Dämpfung). — Fleischmann, ETZ 1906, S. 873; Benischke, El. u. Maschb. 1907, S. 1009 (2 Masch.). — Weißhaar, El. u Maschb. 1908, S. 555 (n Masch.). — van Dyk, ETZ 1911, S. 99 (Versuche). — Punga, ETZ 1911, S. 385 (Versuche). — Schüler, ETZ 1911, S. 1199. — Czeija, ETZ 1912, S. 177. — Ferner Diskussionen zwischen Benischke, Emde, Görges, Rosenberg in d. ETZ u. El. u. Maschb. — Monographien: Benischke, Der Parallelbetrieb d. Wechselstrommasch. Braunschweig 1902. — Huldschiner, Diss. Über d. Pendeln parallel geschalteter Drehstromgen. Voitsche Samml. 1906 (mehrere Masch.). — Sarfert, Diss. Über d. Schwingen d. Wechselstrommasch. m. Parallelbetrieb (n Masch.). Forschungshefte d. V. D. I. 1908.

mit Umdrehungszahlen laufen müssen, die sich umgekehrt wie die Polzahlen verhalten. Es schließt ferner ein, daß die Pole dauernd nahezu gleiche relative Stellungen zu den Ankerwicklungen bewahren müssen. Andernfalls fallen die Maschinen „außer Tritt", wodurch der Betrieb gestört wird, so daß er unterbrochen werden muß. Der Synchronismus wird durch ein „synchronisierendes Moment" von den Maschinen selbst aufrecht erhalten. Es werde zunächst angenommen, daß die betrachtete Maschine auf ein unendlich starkes Netz arbeite, d. h. daß Größe und Frequenz der Klemmenspannung P vollkommen konstant seien.

(469) Voreilung. Aus dem Diagramm (Abb. 232) ergibt sich, daß der Vektor von E_λ eine Voreilung vor dem Vektor der Klemmenspannung P hat, die mit der Belastung wächst. Denkt man sich zwei gleiche Maschinen, von denen die eine leer läuft, und deren E_λ daher mit P zusammenfällt, während die zweite belastet ist, so muß die letztere relativ eine Voreilung vor der leer laufenden Maschine haben. Diese Voreilung ist bei zweipoligen Maschinen gleich dem Winkel $\alpha = C_1OK$, bei p Polpaaren dagegen nur der p-te Teil, also α/p.

(470) Leistungslinien. (Görges, ETZ 1900, S. 188.) Wenn die Leistung N_e der EMK des Generators, d. h. das Produkt $E\,I\cos\vartheta$ eines Zweiges der Ankerwicklung, wobei ϑ die Phasenverschiebung zwischen E und I ist, konstant gehalten wird, so bleibt bei konstantem E auch die Projektion $I\cos\vartheta$ des I-Vektors auf den E-Vektor konstant, Abb. 232. Folglich bleibt auch die Projektion von Π_a auf eine Senkrechte zu $\Phi_a = OA$ konstant. Bei konstanter Leistung und veränderlicher Phasenverschiebung bewegt sich mithin der Endpunkt von Π_a auf einer Parallelen zu OA. Dasselbe muß von Punkt C gelten, denn man kann die Maßstäbe für H_a und Δ_a so wählen, daß $\Pi_a = AC$. Punkt C_1 bewegt sich dann auf einer Parallelen zu OA_1. Diese Gerade heißt daher eine Leistungslinie. Man erkennt, daß die Leistungslinie für $N_e = 0$ nicht mit OA_1 zusammenfällt, sondern etwas links davon liegt, weil Π_a dann nicht verschwindet, sondern gleich H_a wird. $E_\lambda = OC_1$ ist die EMK, die vorhanden sein würde, wenn die Maschine nicht gesättigt wäre. Man darf daher zur Konstruktion des Punktes $C_1 E_\lambda$ nicht aus der Leerlaufcharakteristik entnehmen, weil man dadurch den Wert OC_1' erhält.

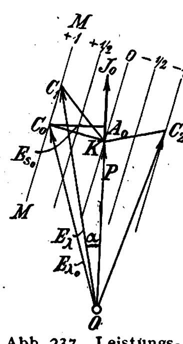


Abb. 237. Leistungslinien.

Man denke sich nun, daß nicht E, sondern die Klemmenspannung P der Maschine konstant bliebe, etwa dadurch, daß sie auf Sammelschienen arbeitet, deren Spannung durch den nach Größe und Richtung unveränderlichen Vektor $P = OK$, Abb. 237, dargestellt werde. Man kann dann leicht nachweisen, daß die Leistung der Maschine $N_p = P\,I\cos\varphi$ unverändert bleibt, wenn sich der Endpunkt C des Vektors der fiktiven EMK bei Leerlauf E_λ auf einer bestimmten durch C_0 gelegten Geraden MM bewegt. Diese Gerade wird gefunden, indem man den Vektor E_{λ_0} für den Fall, daß keine Phasenverschiebung vorhanden ist, bei der gegebenen Leistung konstruiert und durch seinen Endpunkt C_0 eine Senkrechte zu KC_0 zieht. Zu jeder Leistung gehört eine Leistungslinie, deren Abstand vom Punkte K der Leistung proportional ist. Wird die der Maschine von ihrer Antriebsmaschine zugeführte Leistung größer, so wird der Winkel α größer, der Endpunkt C des Vektors E_λ gelangt auf eine andere Leistungslinie, und die Maschine gibt mehr Leistung ab, ohne daß sich ihre Geschwindigkeit ändert. Es hat sich nur infolge einer vorübergehenden Beschleunigung die relative Lage des rotierenden Teiles der Maschine, d. i. ihre Voreilung, geändert. Entspricht überhaupt aus irgend einem Grunde die augenblickliche Lage nicht dem Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgegebener Leistung, so tritt ein synchronisierendes Moment auf, das die Voreilung vergrößert oder verkleinert und dadurch die richtige Lage wiederher-

stellt. Aus dem Diagramm der Leistungslinien läßt sich ableiten, daß das synchronisierende Moment M der Winkelabweichung $\Delta\alpha$ des Vektors E_λ von der richtigen Lage OC_1 proportional ist. Das der Abweichung Eins (im Bogenmaß gemessen) entsprechende Moment kann man als das synchronisierende Richtmoment D_s bezeichnen. Man erhält dann

$$M = D_s \cdot \Delta\alpha \quad \text{und} \quad D_s = \frac{p^2}{2\pi f} \cdot N\left(\frac{P}{E_{s_0}} + \operatorname{tang}\varphi\right).$$

Hierin bedeutet p die Polpaarzahl, f die Frequenz in Per/s, N die normale Leistung in Watt gleich der zugeführten Leistung, indem von Verlusten abgesehen wird, P die Klemmenspannung, E_{s_0} den induktiven Spannungsverlust bei der Leistung N und $\cos\varphi = 1$, φ die bei dieser Leistung vorhandene Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Klemmenspannung der Maschine.

(471) Eigenschwingungen (B o u c h e r o t). Das synchronisierende Moment hat zur Folge, daß bei Abweichungen von der richtigen Lage OC_1 Schwingungen um diese Lage auftreten, deren Dauer gegeben ist durch die Beziehung

$$T = \frac{2\pi}{p} \cdot \sqrt{\frac{2\pi f J}{N(P/E_{s_0} + \operatorname{tang}\varphi)}},$$

worin T die Dauer einer ganzen Schwingung (hin und her) in Sekunden, J das Trägheitsmoment im absoluten Maßsystem in m²kg, N die Leistung in Watt. Eigenschwingungen können bei jeder Art des Antriebes auftreten, sie werden aber meistens nach kurzer Zeit durch Dämpfung beseitigt.

Es sind indessen eine Reihe Fälle beobachtet worden, in denen die Eigenschwingungen nicht verschwinden, sondern entweder dauernd für sich allein bestehen bleiben oder mit erzwungenen Schwingungen dauernd Schwebungen bilden. Sie werden begünstigt, wenn die Polschäfte aus massivem Eisen bestehen, oder wenn sie von Metallteilen (z. B. metallenen Spulenkasten) umgeben sind, die so in sich geschlossen sind, daß sich darin Ströme bilden können, welche die Polschäfte umkreisen, oder wenn der Erregerkreis wenig Widerstand, wie bei der Erregung durch Akkumulatoren, besitzt. Damit nämlich die jeder Voreilung entsprechende Leistung sofort auftreten kann, muß sich der Magnetismus auch sofort um die dazu nötigen Beträge ändern können. Es geht aber aus Abb. 232 hervor, daß die EMK OA_1 etwas wachsen muß, wenn bei konstantem P die Leistung größer wird, und proportional mit OA_1 muß $\Phi_a = OA$ wachsen. Es muß daher alles vermieden werden, was die Einstellung des Magnetismus Φ_a verlangsamt. Vgl. W a g n e r, El. u. Maschb. 1908, S. 686. — D r e y f u s, El. u. Maschb. 1911, S. 323.

(472) Erzwungene Schwingungen. Es kann auch die Antriebsmaschine die Urheberin von Schwingungen sein, wenn nämlich ihre Leistung während einer Umdrehung nicht konstant ist, sondern periodischen Variationen wie bei Kolbenmaschinen unterliegt. Man kann diese Variationen durch eine Reihe von Sinusschwingungen ersetzen, deren erste eine Schwingungsdauer gleich der Dauer einer Umdrehung (bei Dampfmaschinen) oder gleich der Dauer eines Arbeitsprozesses (z. B. bei Viertaktmaschinen), und deren folgende eine Dauer gleich der Hälfte, einem Drittel, einem Viertel der Schwingungsdauer der ersten Schwingung haben. Jede solche Schwingung in der Leistungszufuhr ruft eine entsprechende Schwingung in der Geschwindigkeit hervor. Der Gang wird daher ungleichförmig, und in der Stellung finden Abweichungen von der „Sollstellung" statt. Man nennt diese Schwingungen, deren Dauer von der Antriebsmaschine abhängt, „erzwungene Schwingungen". Wenn eine Maschine für sich allein arbeitet, derart, daß ihre Belastung im wesentlichen als konstant angesehen werden kann, so ergibt sich der Ungleichförmigkeitsgrad im Gange der Maschine (gleich $(v_{max} - v_{min})/v_{mittel}$, wenn v die Geschwindigkeit) aus dem Tangentialdruckdiagramm, besser Momentendiagramm genannt, und dem Trägheitsmoment nach den Regeln des Maschinen-

baues. Wenn dagegen mehrere Maschinen parallel arbeiten, so wird der Ungleichförmigkeitsgrad infolge von „Mitschwingen" vergrößert. Daraus ergeben sich mehr oder minder große Schwingungen in der Stromstärke, der Leistung, ja auch der Spannung, und die Maschinen sind der Gefahr ausgesetzt, aus dem Tritt zu fallen. Auf keinen Fall darf die Eigenschwingungsdauer T_0 mit der Dauer einer der erzwungenen Schwingungen T_{a1}, T_{a2} ... ganz oder nahezu übereinstimmen. Nachträglich kann man durch Einschalten von Drosselspulen in die Ankerkreise E_{s0} vergrößern und dadurch Abhilfe schaffen. Gefährlich ist bei Dampfmaschinen und Zweitakt-Gasmotoren in der Regel nur die Grundschwingung, deren Dauer gleich der Dauer einer Umdrehung der Kurbelwelle ist, bei Viertakt-Gasmaschinen die Grundschwingung, deren Dauer gleich der Zeit zweier Umdrehungen der Kurbelwelle ist, und die erste Oberschwingung. Beide lassen sich aus dem Momentendiagramm berechnen, vergl. die Hinweise in (459). Das Mitschwingen wird durch Dämpfung verkleinert.

(473) Resonanzmodul. Die Vergrößerung des Ungleichförmigkeitsgrades wird für den Fall, daß keine Dämpfung vorhanden ist, durch den Resonanzmodul ζ angegeben, wobei

$$\zeta = \pm \frac{T_0^2}{T_0^2 - T_a^2} = \pm \frac{z_a^2}{z_a^2 - z_0^2}$$

Hierin ist T_0 die Eigenschwingungsdauer (471), T_a die Schwingungsdauer der Antriebsmaschine, z_0 und z_a sind die entsprechenden Schwingungszahlen. In Abb. 238 stellen die ausgezogenen Kurven die Abhängigkeit des Resonanzmoduls von z_0/z_a für die Grundschwingung (ζ_1) und die erste Oberschwingung (ζ_2) dar. Ist $T_0 = T_a$, so ist vollkommene Resonanz vorhanden und ein Betrieb ohne Dämpfung unmöglich. Für einen sicheren Betrieb muß T_0 größer als T_a gewählt werden. Hierzu ist ein um so größeres Trägheitsmoment erforderlich, je geringer die Drehzahl und je größer die Schwingungsdauer T_a der Antriebsmaschine ist. Bei Viertakt-Gasmotoren muß das Trägheitsmoment besonders groß gewählt werden, damit T_0 größer als die Dauer T_{a_1} der Grundschwingung ist. Manche Konstrukteure ziehen es daher vor, in solchen Fällen T_0 zwischen die Dauer T_{a1} der Grundschwingung und die Dauer T_{a_2} der ersten Oberschwingung fallen zu lassen. Es besteht dann aber die Gefahr, daß Resonanz mit einer der beiden Schwingungen eintritt.

(474) Dämpfung. Die Ankerströme erzeugen ein rotierendes Feld, (448 u. 449), das in den massiven Teilen der Polschuhe und in besonderen Dämpfungswicklungen Ströme induziert, sobald die Feldmagnete Schwingungen ausführen. Hierdurch werden die Schwingungen gedämpft. Die Dämpfungswicklung von Hutin und Leblanc besteht aus starken Kupferbolzen, die nahe der Peripherie durch die Polschuhe gezogen und auf beiden Seiten entweder sämtlich oder nur, soweit sie einem und demselben Polschuh angehören, durch starke Kupferstücke gut leitend miteinander verbunden sind.

Die Dämpfung kann schädlich oder nützlich wirken. Eine mäßige Dämpfung wirkt immer nützlich, indem sie die Eigenschwingungen beseitigt. Eine starke Dämpfung verringert die erzwungenen Schwingungen, damit aber auch zugleich die Wirksamkeit des Schwungrades, das Energie nur bei Geschwindigkeitsänderungen aufnehmen und abgeben kann. In diesem Falle können die Schwankungen der abgegebenen Leistung größer ausfallen.

Um starke Erwärmung der Dämpferstäbe zu verhüten, sind entweder die Abstände der Dämpferstäbe voneinander gleich der Zahnteilung auf dem Anker zu machen, oder es ist bei Schrägstellung der Polkanten und der Dämpferstäbe der Winkel so zu wählen, daß man beim Durchlaufen eines Stabes um den Abstand zweier Stäbe auf dem Umfang weiterschreitet (vgl. Schmidt, ETZ 1915, S. 187).

(475) Ungleichförmigkeitsgrad der Leistungsabgabe. Die gesamte ins Netz gelieferte Leistung N setzt sich aus der Leistung zusammen, die der Voreilung proportional ist, und der Dämpfungsleistung, die der Leistung asynchroner Strom-

erzeuger, (502) und (527), entspricht. Der Ungleichförmigkeitsgrad der Gesamtleistung ist, wenn die Dämpfung fehlt,

$$\delta = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{mittel}} = \pm 2 \frac{R}{N_{mittel}} \cdot \frac{z_0^2}{z_0^2 - z_a^2} = \pm 2 \frac{R}{N_{mittel}} \cdot \xi$$

und bei unendlich starker Dämpfung gleich $\delta = 2 \frac{R}{N_{mittel}}$.

Hierin bedeutet R die Amplitude der betrachteten einfachen Schwingung der Leistung, die man sich der mittleren Leistung überlagert denken muß. In Abb. 238 stellen die gestrichelten Kurven die Abhängigkeit der Zahl ξ von z_0/z_a für die Grundschwingung und die erste Oberschwingung dar. Die Rechnung ergibt, daß die Dämpfung den Ungleichförmigkeitsgrad der Leistungsabgabe vergrößert, wenn $z_0/z_a < \sqrt{2}$ ist. In diesem Falle ist $\zeta < 2$, $\xi < 1$. Wenn dagegen $z_0/z_a > \sqrt{2}$ ist. so ist die Dämpfung immer nützlich, besonders wenn z_0/z_a ganz oder nahezu gleich 1 ist, d. h. im Falle der Resonanz. Sie kann den Ungleichförmigkeitsgrad der

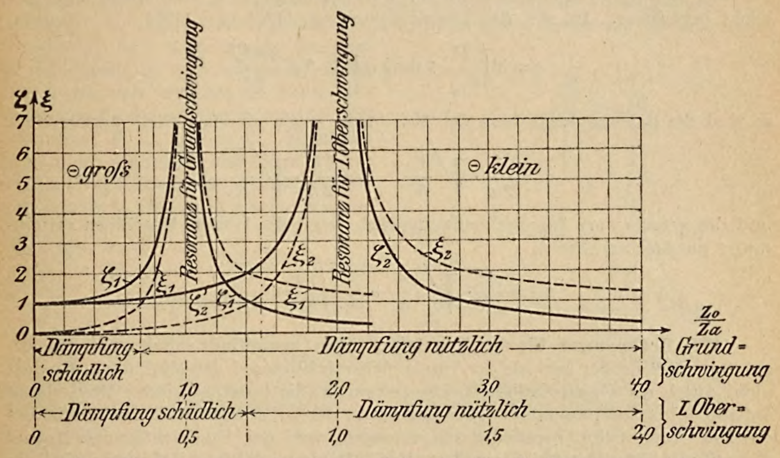


Abb. 238. Resonanzmodul beim Parallelbetrieb (der Wechselstrommaschinen).

Leistungsabgabe dann aber höchstens bis auf $2\ R/N_{mittel}$ verkleinern. Nützlich ist die Dämpfung besonders bei Maschinen mit geringem Trägheitsmoment, deren Antrieb ziemlich gleichförmig ist, die aber infolge von Resonanz besonders stark schwingen. Liegt z_0 zwischen z_{a_1} und z_{a_2}, so ist die Dämpfung hinsichtlich der Grundschwingung nützlich, hinsichtlich der ersten Oberschwingung schädlich.

Das von den Maschinenfabriken gewöhnlich angegebene Schwungmoment GD^2 ist gleich dem vierfachen Trägheitsmoment, beide in m^2kg gemessen.

(476) Parallelbetrieb beliebig vieler Maschinen. (Fleischmann, Huldschiner, Sarfert, Görges, Weißhaar, siehe S. 305, Fußnote.) Im allgemeinen ist die Bedingung, daß Größe und Frequenz der Netzspannung konstant seien, nicht erfüllt. Es ergibt sich dann, daß sich Synchronmotoren und synchrone Umformer genau so verhalten wie Synchrongeneratoren. Der Betrieb einer Kraftübertragung mit einem Synchrongenerator und einem Synchronmotor unterliegt z. B. denselben Gesetzen, wie der Parallelbetrieb zweier Synchrongeneratoren, wenn sie auf feste Ohmsche Widerstände arbeiten. Auch asynchrone Maschinen können ins Schwingen geraten, aber nur erzwungene Schwingungen ausführen, weil ihnen das synchromisierende Richtmoment fehlt. Beim Betriebe von n Syn-

chronmaschinen sind $(n-1)$ Eigenschwingungszahlen vorhanden, die bei gleichen oder ähnlich gebauten Maschinen in eine einzige zusammenfallen. Resonanz mit jeder einzelnen Eigenschwingung stört den Betrieb des ganzen Systems. Die Störung kann von jeder Maschine ausgehen, z. B. von einem Induktionsmotor, der eine Kolbenpumpe antreibt. Bei Kurbelsynchronismus ist zwar der Parallelbetrieb der Generatoren einer Zentrale leichter aufrecht zu erhalten, allein das Parallelschalten selbst ist schwierig und sehr zeitraubend. Er ist aber direkt gefährlich, wenn Synchronmotoren und Umformer an das Netz angeschlossen sind, weil diese dann leicht ins Schwingen kommen. Eine gleichmäßige Verteilung der Kurbelstellungen ist dann bei weitem vorzuziehen. Bei drei gleichen Dampfmaschinen oder vier gleichen Viertakt-Gasmotoren verhält sich die Klemmenspannung, wenn die Kurbeln gleichmäßig verstellt sind, bereits ähnlich wie in einem unendlich starken Netz; man kann also die Gesetze anwenden, die für eine Maschine in Parallelschaltung mit einem unendlich starken Netz gelten.

Die Eigenschwingungszahl zweier parallelgeschalteter Maschinen läßt sich leicht berechnen. Ist mit den Bezeichnungen in (470) und (471)

$$r = N\left(\frac{P}{E_{s_0}} + \operatorname{tang}\varphi\right), \quad \vartheta = \frac{2\pi f J}{p^2}$$

so sind die Schwingungszahlen der Maschinen gegen ein unendlich starkes Netz

$$z_1 = \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{r_1}{\vartheta_1}}, \quad z_2 = \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{r_2}{\vartheta_2}}$$

und die gemeinsame Eigenschwingungszahl, wenn die beiden Maschinen miteinander parallel arbeiten,

$$z_{12} = \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\left(\frac{1}{\vartheta_1}+\frac{1}{\vartheta_2}\right)\Bigg/\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)}.$$

(477) Bedingungen für den Regulator. Der Unempfindlichkeitsgrad des Regulators muß größer sein als der Ungleichförmigkeitsgrad der Maschine. Er darf nicht durch die Geschwindigkeitsschwankungen, die innerhalb jeder Umdrehung auftreten, ins Spiel kommen. Ein Regulator, der bei Einzelbetrieb ausgezeichnet arbeitet, kann beim Parallelbetrieb versagen, weil der Ungleichförmigkeitsgrad dann durch Mitschwingen vergrößert wird. In einem solchen Falle kann eine am Regulator angebrachte Dämpfung, z. B. eine Ölbremse, den Fehler beseitigen. Man tut aber gut, von vornherein gut statische Regulatoren vorzusehen, die zwischen Leerlauf und Vollbelastung eine Änderung der Drehzahl um mindestens 5% verursachen. Die Regulatoren müssen während des Betriebes verstellbar sein, um die zugeführte Leistung bei konstanter Geschwindigkeit einstellen zu können. Denn da die Frequenz konstant gehalten wird, muß die Leistung jeder Maschine beim Zu- und Abschalten bei gegebener Geschwindigkeit auf Null gebracht und während des Betriebes auf jeden Betrag bis zur Höchstleistung eingestellt werden können.

(478) Parallelschalten und Hilfsmittel dazu. (Teichmüller, ETZ 1909, S. 1039, ETZ 1910, S. 265.) Man kann einen Pol einer Wechselstrommaschine mit einem Pol einer anderen verbinden. Die beiden noch freien Pole dürfen miteinander verbunden werden, wenn sie dasselbe Potential haben, also keine Spannung zwischen ihnen herrscht. Man erkennt dies daran, daß man einen geeigneten Spannungszeiger zwischen die Pole schaltet oder eine Reihe hintereinander geschalteter Glühlampen, die für eine Gesamtspannung gleich der Summe der EMKe beider Maschinen zu wählen sind. Ist die Spannung sehr hoch, so nimmt man kleine Transformatoren, deren Hochspannungswicklungen zwischen die Klemmen je einer Maschine und deren Niederspannungswicklungen unter Einschluß eines Spannungszeigers oder einer Glühlampe gegeneinander geschaltet werden. Das



Verschwinden des Ausschlags beim Zeiger und das Erlöschen der Lampen zeigt den Augenblick an, in dem parallel zu schalten ist. Der Symmetrie halber schaltet man zwischen je zwei zu verbindende Pole eine (oder die gleiche Anzahl) Glühlampen. Haben die Maschinen verschiedene Frequenzen, so werden die Lampen abwechselnd hell und dunkel. Dies erzeugt bei großer Verschiedenheit ein Flimmern der Lampen, bei geringer ein langsames Aufleuchten und Verlöschen. Dieser letztere Zustand ist durch Verstellung des Regulators der Antriebsmaschine gut herzustellen. In den Fällen, wo eine Regulierung durch Verstellung des Regulators unmöglich ist, muß eine Belastungsbatterie angewendet werden, doch geschieht dies heutzutage selten. Zu demselben Zwecke hat Dettmar eine Wirbelstrombremse vorgeschlagen, (ETZ 1899, S. 728). Auch selbsttätige Vorrichtungen zum Parallelschalten sind im Betrieb, vgl. Benischke, ETZ 1905, S. 642, Besag, ETZ 1910, S. 647 u. ETZ 1912, S. 135.

(479) Gleichlaufzeiger. Die Spannung, die jede Lampe oder Lampengruppe erhält, ergibt sich aus dem Diagramm Abb. 239. $A_1 B_1$ ist die Klemmenspannung der einen, $A_2 B_2$ die der anderen Maschine. Läuft Maschine II langsamer als Maschine I, so müßte man annehmen, daß ihre Zeitlinie langsamer umläuft als die andere, oder man nimmt an, daß nur eine Zeitlinie vorhanden ist, dafür aber $A_2 B_2$ sich langsam im Sinne des Uhrzeigers dreht. Dadurch werden die Spannungen $A_1 A_2$ und $B_1 B_2$, denen die Glühlampen ausgesetzt sind, erst größer, bis sie die volle Spannung einer Maschine erreicht haben, und dann wieder kleiner.

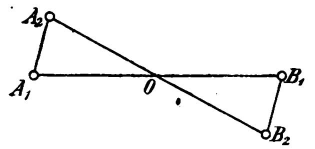


Abb. 239. Spannungsdiagramm beim Phasenvergleichen zweier Einphasenmaschinen.

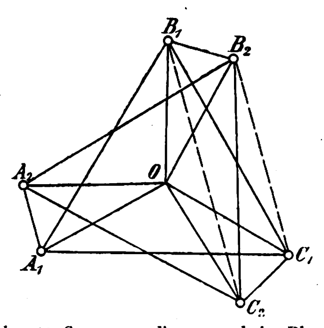


Abb. 240. Spannungsdiagramm beim Phasenvergleichen zweier Drehstrommaschinen.

Die Parallelschaltung muß erfolgen, wenn $A_1 B_1$ und $A_2 B_2$ einander genau decken. Diese Anschauung erklärt die Vorgänge beim Parallelschalten von Drehstrommaschinen besonders einfach. Man schalte zwischen je zwei zusammengehörige Klemmen eine Glühlampe oder eine Gruppe von solchen und vertausche nötigenfalls die Anschlüsse an einer Maschine so lange, bis alle Lampen zugleich hell und dunkel werden. Die Pole, die nun durch Lampen miteinander verbunden sind, müssen auch beim Parallelbetrieb verbunden sein. Man schaltet wieder parallel im Augenblicke, wo die Lampen dunkel sind wie vorher. Im Diagramm (Abb. 240) sind die Lampenspannungen $A_1 A_2$, $B_1 B_2$, $C_1 C_2$. Jede Lampengruppe muß, wie das Diagramm zeigt, das Doppelte der Sternspannung, d. h. das $2/\sqrt{3}$ fache der Drehstromspannung aushalten können. Schaltet man aber nach Michalke eine Lampengruppe zwischen A_1 und A_2, die zweite zwischen B_1 und C_2, die dritte zwischen C_1 und B_2, so werden die Lampengruppen nacheinander hell und dunkel. Wenn man sie in den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks anordnet, so sieht man den Lichtschein rotieren, und zwar im einen oder anderen Sinne, je nachdem Maschine II zu langsam oder zu schnell läuft. Man kann dies am Diagramm leicht verfolgen, wenn man das Diagramm der Maschine II langsam nach links oder rechts dreht. Die Parallelschaltung muß jetzt erfolgen, wenn die Lampengruppe $A_1 A_2$ dunkel ist. Die Vorrichtung zur Einstellung des Synchronismus und der Phasengleichheit nennt man „Phasenvergleicher". Eine einfache Anordnung ist die der Siemens-Schuk-

kertwerke, bei der 6 Glühlampen in einem Gehäuse in einem Kreise angeordnet sind. Je zwei einander gegenüberliegende Lampen sind hintereinander geschaltet. Die Lampen selbst sind verdeckt und beleuchten einen Reflektor, auf dem eine rotierende Lichtlinie erscheint. Man hat dasselbe Prinzip auch benutzt, um die Maschinen selbsttätig parallel zu schalten (478). Hartmann und Braun liefern zum Phasenvergleichen Frequenzmesser, die von den Spannungen beider Maschinen gleichzeitig erregt werden und daher bei Phasengleichheit einen besonders großen konstanten Ausschlag haben. (ETZ 1904, S. 44, ETZ 1910, S. 1307.)

(480) Hellschaltung und Dunkelschaltung. Bei der beschriebenen Anordnung gibt das Verlöschen einer Lampe an, wann die Maschinen parallel geschaltet werden müssen. Manche Ingenieure ziehen es vor, die Lampen so zu schalten, daß im Augenblick des stärksten Aufleuchtens parallel geschaltet werden muß. Bei Einphasenstrom braucht man die Lampen nur zwischen A_2 und B_1 sowie zwischen B_2 und A_1, Abb. 239, zu schalten. Bei Drehstrom ist zur Herstellung der Hellschaltung stets noch ein Transformator erforderlich, um die Phasen um 180° umzukehren. Man denke sich zunächst beide Wicklungen des Transformators gleichsinnig in Stern geschaltet, so daß in einem bestimmten Augenblick die EMKe in homologen Zweigen der Primär- und der Sekundärwicklung vom Nullpunkt nach den Außenklemmen hin gerichtet sind. Man schneide jetzt die Sekundärwicklung am Nullpunkt auf, so daß hier die drei Klemmen entstehen, und vereinige die bisherigen drei Klemmen zum Nullpunkt, so hat man die Phasen um 180° umgekehrt.

(481) Verteilung der Last auf parallellaufende Maschinen. Nachdem die Maschinen parallel geschaltet worden sind, kann man ihre Leistung nicht durch Verstellung des Regulierwiderstandes einstellen, sondern nur durch Verstellung des Regulators der Antriebsmaschine. Man wird z. B. bei Dampfmaschinen den Regulator der zugeschalteten Maschine auf größere Dampfzufuhr einstellen, die übrigen auf verminderte Dampfzufuhr. Zur Erkennung der Leistung erhält jede Dynamomaschine zweckmäßig einen Leistungszeiger. Wie die Leistungslinien zeigen (470), kann die Stromstärke bei gegebener Leistung sehr verschieden groß sein. Man verstellt daher die Regulierwiderstände so, daß alle Maschinen bei gleicher Leistung auch dieselbe Stromstärke liefern.

Zum Zwecke des Abschaltens vermindert man durch Verstellung des Regulators der Antriebsmaschine die Leistung bis auf Null und verringert dann mit Hilfe des Nebenschlußregulierwiderstandes auch die Stromstärke bis auf Null. Die Schalter können dann ohne Funken und ohne die geringste Störung im Betriebe geöffnet werden.

Über asynchrone Generatoren (sogenannte Induktionsgeneratoren) vgl. (527).

Wechselstrommotoren.

(482) Arten der Motoren. Man unterscheidet

1. Synchronmotoren,
2. Asynchronmotoren.
   a) Induktionsmotoren mit Schleifring- oder Kurzschlußanker.
   b) Kommutatormotoren.

Die Synchronmotoren laufen mit einer genau durch die Frequenz vorgeschriebenen Geschwindigkeit, die die synchrone oder die Geschwindigkeit bei Synchronismus heißt. Bei ihr legt der Läufer während einer Periode des Wechselstromes genau die doppelte Polteilung zurück. Die Drehzahl ist daher genau $n = 60 f/p$, also bei 50 Per/s 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500, 429, 375, 333, 300 usw.

Die Asynchronmotoren laufen mit einer vom Synchronismus abweichenden Geschwindigkeit. Bei den Induktionsmotoren weicht die Drehzahl nur wenig von der des Synchronismus ab — sie laufen bei allen Belastungen mit annähernd derselben Geschwindigkeit und gleichen darin den Neben-

schlußmotoren für Gleichstrom. Die Geschwindigkeit der Kommutatormotoren weicht oft sehr erheblich von der des Synchronismus ab; man unterscheidet sie in solche, die mit annähernd konstanter Geschwindigkeit laufen, und solche, bei denen die Geschwindigkeit mit zunehmender Belastung stark abnimmt.

Hiernach kann man zwischen Asynchronmotoren mit Nebenschlußcharakteristik und solchen mit Reihenschlußcharakteristik unterscheiden. Hauptvertreter der ersteren sind die Induktionsmotoren, die Kommutatormotoren haben meistens Reihenschlußcharakteristik. Bemerkenswert ist, daß alle Einphasenmotoren mit Nebenschlußcharakteristik nicht von selbst anlaufen, sondern dazu besonderer Mittel bedürfen.

Synchronmotoren.

(483) Verhalten der Synchronmotoren. Die Synchronmotoren unterscheiden sich in der Bauart nicht von den Synchrongeneratoren; sie sind nichts anderes als in der Wirkung umgekehrte Generatoren. Ihre Arbeitsweise kann daher in derselben Art wie die der Generatoren an der Hand der Darstellung der Leistungslinien (470) erklärt werden. Entzieht man nämlich einem Synchrongenerator nach dem Parallelschalten zu anderen Generatoren die antreibende Kraft, so läuft er als Motor weiter, wobei sich lediglich die relative Lage der Pole zum Anker verändert, was gleichbedeutend ist mit einer Veränderung der Phase der fiktiven EMK E_λ bei Leerlauf, Abb. 237. Der Endpunkt C des Vektors E_λ bewegt sich im Diagramm nach rechts, bis er eine Leistungslinie erreicht, die der von der Maschine abzugebenden mechanischen Leistung entspricht, etwa in die Lage OC_2. KC ist stets der Stromstärke proportional. Wird die Erregung geändert, so ändert sich auch E_λ, und C wandert auf derselben Leistungslinie, so daß sich eine andere Stromstärke und eine andere Phasenverschiebung als vorher ergibt. Konstruiert man für verschiedene Erregungen die Stromstärken bei unveränderter Leistung, so ergibt sich, wenn man die Erregerstromstärken als Abszissen und die Ankerstromstärken als Ordinaten in ein Koordinatensystem einträgt, die sogenannte V-Kurve. Die V-Kurve ist am spitzesten bei Leerlauf und flacht sich mit der Belastung des Motors immer mehr ab (Abb. 241).

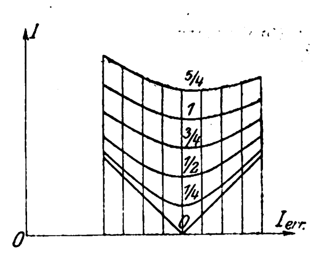


Abb. 241. V-Kurven des Synchronmotors.

(484) Phasenverschiebung. Die graphische Darstellung in Leistungslinien zeigt also die bemerkenswerte Tatsache, daß, gleichgültig was für Belastung vorhanden ist, durch Änderung der Erregung jede beliebige Phasenverschiebung, also auch Phasenvoreilung eingestellt werden kann, daß daher die Stromstärke unabhängig von der Leistung in weiten Grenzen veränderlich ist, und daß selbst im Leerlauf starke Ströme aufgenommen werden können.

(485) Überlastungsfähigkeit. Aus dem Leistungsliniendiagramm erkennt man, daß Synchronmotoren eine bedeutende Überlastung vertragen, sofern vom Netz her auch bei großer Stromentnahme die Klemmenspannung aufrecht erhalten werden kann. Die größte zulässige Belastung ist durch die Leistungslinie gegeben, die den mit E_λ um O geschlagenen Kreis berührt. Da sich annähernd OC zu KC, Abb. 237, wie die Kurzschlußstromstärke bei der zu E_λ gehörigen Erregung zur Normalstromstärke verhält, so folgt, daß sich die größte Leistung zur Normalleistung ungefähr wie der Kurzschlußstrom zum Normalstrom verhält, oder mit anderen Worten, daß die Überlastungsfähigkeit um so größer ist, je geringer der induktive Spannungsabfall im Motor ist.

(486) Vorzüge und Nachteile der Synchronmotoren. In der Einstellbarkeit der Phasenverschiebung besteht der Hauptvorteil des Synchronmotors. Man kann durch passende Erregung mit dem Leistungsfaktor Eins arbeiten, ja man kann den Synchronmotor sogar als Phasenregler in stark mit Blindströmen belasteten Netzen benutzen, indem man ihn mit Phasenvoreilung laufen läßt.

Diesen Vorteilen stehen als empfindliche Nachteile die Notwendigkeit einer besonderen Erregung mit Gleichstrom und die Unmöglichkeit des Anlassens unter Last bei normaler Frequenz gegenüber. Der Synchronmotor kann nur bei Synchronismus ein Drehmoment ausüben; soll er daher unter Last von selbst anlaufen, so ist dies nur zu erreichen, wenn der als Stromquelle dienende Generator zu gleicher Zeit angelassen und synchron mit dem Motor beschleunigt wird. Dies ist aber nicht ausführbar, wenn der Generator auch für andere Betriebe Strom zu liefern hat und daher dauernd läuft. Ferner stößt dies Verfahren auf Schwierigkeiten, wenn zwischen Generator und Motor eine längere mit Widerstand und Selbstinduktion behaftete Leitung liegt, weil in dieser bei der der Zugkraft entsprechenden Stromstärke ein größerer Spannungsverlust entsteht, als der Generator bei der ganz geringen Anfangsgeschwindigkeit Spannung liefern kann.

Ohne Belastung kann man bei Aufwendung starker Ströme Synchronmotoren anlassen, wenn man die Erregung ganz ausschaltet; sie laufen dann wie ein Induktionsmotor infolge von Wirbelstrombildung in den Polschuhen, jedoch mit geringer Kraft an. Vgl. (502). Im Erregerkreis werden dabei sehr hohe, für die Isolation und für das Bedienungspersonal gefährliche Spannungen induziert, so daß diese Anlaufmethode besondere Vorsichtsmaßregeln bedingt. Die Gefahr besteht bei Einphasensynchronmotoren so lange, wie die Erregerwicklung nicht geschlossen wird; bei Mehrphasenstrommotoren ist sie am größten, so lange der Motor steht, und nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit des Motors ab (449).

Das beste Mittel zum Anlassen ist die Anordnung eines besonderen Anlaßmotors (Motors für kurzzeitigen Betrieb). Der Zuschaltung des Wechselstrommotors auf das Netz muß dann das Phasenvergleichen und Synchronisieren voraufgehen, genau wie bei den Generatoren (478).

Einphasen-Synchronmotoren können in beliebiger Richtung, Drehstrom- und Zweiphasen-Synchronmotoren nur in einer bestimmten Richtung betrieben werden. Soll bei letzteren der Drehungssinn geändert werden, so hat man beim Drehstrom zwei Zuleitungen, beim Zweiphasenstrom die beiden Zuleitungen eines der beiden Stromkreise miteinander zu vertauschen.

Auch die Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer verhalten sich hinsichtlich des Anlassens und des Betriebes wie die Synchronmotoren (555).

Asynchronmotoren.

(487) Bei den **Induktionsmotoren** wird nur dem einen Teil — dem Primäranker — Strom vom Netz zugeführt, während die Ströme im anderen Teile — dem Sekundäranker — durch eine Transformatorwirkung induziert werden. Man kann sie als Transformatoren betrachten, deren Wicklungen möglichst nahe beieinander, aber auf getrennten Eisenkörpern liegen, von denen der eine konzentrisch im anderen rotieren kann; es ergibt sich hierbei eine Kraftwirkung, die zur Abgabe mechanischer Leistung ausgenutzt werden kann. Induktionsmotoren werden entweder als Mehrphasenmotoren (Drehstrom-, Zweiphasen-, n-Phasenmotoren) ausgeführt und haben dann die Eigenschaft, von selbst anzulaufen, oder als Einphasenmotoren und können in dieser letzteren Form nur unter Anwendung besonderer Hilfsmittel in Gang gebracht werden.

Die Mehrphasenmotoren sind den Einphasenmotoren hinsichtlich Preis und Betriebseigenschaften erheblich überlegen.



(488) Arbeitsweise der Induktionsmotoren. Die mechanische Wirkung kommt bei den Mehrphasenmotoren dadurch zustande, daß ein magnetisches Drehfeld erzeugt wird, das sich über den sekundären Teil hinwegbewegt und dabei in letzterem Ströme induziert, die mit dem Drehfeld zusammen ein Drehmoment ergeben.

Auch bei den Einphasenmotoren entsteht ein Drehfeld, wenn der Motor rotiert, doch weichen die Vorgänge in seinem Sekundäranker erheblich von denen im Mehrphasenmotor ab.

Das Drehfeld schreitet in einer Periode des in der Wicklung fließenden Wechselstromes um die doppelte Polteilung, d. i. um den einem Polpaar entsprechenden Teil des Umfanges fort. Die Zahl der minutlichen Umdrehungen des Drehfeldes im Raum ist daher $n = 60 f/p$, worin f die Frequenz, p die Polpaarzahl bedeutet. Man nennt diese Zahl die Drehzahl bei Synchronismus.

Der Läufer läuft bei Leerlauf nahezu synchron; bei Belastung nimmt er eine ,,Schlüpfung" von einigen Prozent an. Die Drehzahl eines Induktionsmotors ist daher angenähert gleich der des Drehfeldes und nach ihr zu berechnen. Man ersieht, daß für geringe Drehzahlen hohe Polzahlen und umgekehrt erforderlich sind, und ferner, daß bei gegebener Frequenz die Drehzahl nicht beliebig gewählt werden kann (vgl. hierzu auch die Normalien des VDE).

(489) Aufbau. Für ein gutes Arbeiten der Induktionsmotoren ist es erforderlich, daß das Zustandekommen des Drehfeldes nicht durch eine Veränderlichkeit des magnetischen Widerstandes längs der Peripherie des Läufers gestört wird; Induktionsmotoren werden deshalb mit genuteten Eisenkörpern in Hohlzylinder- und Walzenform sowohl für den primären als auch für den sekundären Teil ausgeführt. Aus demselben Grunde dürfen beide Teile nicht dieselbe Nutenzahl besitzen. Man spricht deshalb bei ihnen im allgemeinen nicht von ,,Feldmagnet" und ,,Anker", sondern von ,,Primäranker" und ,,Sekundäranker".

Äußerlich unterscheidet man den ,,Ständer" und den ,,Läufer". Der Luftspalt zwischen Ständer und Läufer soll so eng gemacht werden, wie es sonstige Rücksichten, namentlich in mechanischer Hinsicht, gestatten. Kleine Motoren werden mit Luftspalt bis zu 0,5 mm herab, große mit Luftspalt von höchstens 3 mm radialer Tiefe ausgeführt. Aus demselben Grunde führt man die normalen Motoren auch fast durchweg mit nahezu oder auch wohl ganz geschlossenen Nuten aus.

(490) Die **Kommutatormotoren** werden für Mehrphasen- und Einphasenstrom ausgeführt und besitzen einen Läufer mit Kommutator wie die Gleichstrommaschinen. Der Ständer besitzt bei einigen Typen ausgeprägte Pole, bei anderen ist er ein den Läufer eng umschließender Ring mit Nuten an der inneren Zylinderfläche, in denen eine verteilte Wicklung liegt. Letzteres ist nötig, wenn sich ein mehr oder minder vollkommenes Drehfeld ausbilden soll. Kompensationswicklungen und Wendepole oder Wendezähne werden häufig angebracht, (384) und (385). Der Hauptzweck des Kommutators besteht darin, Motoren zu bauen, die auch bei Einphasenstrom mit großer Kraft anlaufen, und deren Geschwindigkeit man wirtschaftlich innerhalb weiter Grenzen ändern kann.

Bei allen Motoren müssen Ständer und Läufer aus dünnen, voneinander isolierten Blechen hergestellt werden. Für den Aufbau gilt das unter (357) bis (379) Gesagte.

Induktionsmotoren.

(491) Der Ständer bildet in der Regel den Primäranker. Das Drehfeld wird in den Drehstrommotoren mit drei unter sich genau gleichen Wicklungszweigen (in der Werkstattsprache wohl auch schlechtweg ,,Phasen" genannt) erzeugt, deren Symmetrieachsen am Umfang in gleicher Weise wie bei den Generatoren um je 2/3 Polteilung gegeneinander verschoben sind und einander entsprechend übergreifen (Abb. 217 bis 220). Die Nutenzahl für Pol und Zweig wird möglichst hoch gewählt, doch ist bei ihrer Festlegung eine Berücksichtigung der Massen-

fabrikation zu empfehlen, sobald es sich um kleinere oder mittlere Typen handelt. Für Zweiphasenmotoren wird das Drehfeld in entsprechender Weise durch Anordnung von zwei um 1/2 Polteilung gegeneinander verschobenen Wicklungszweigen erzeugt. Die Schaltungs- und Wicklungsmöglichkeiten entsprechen genau denen der Generatoren (443) bis (447).

(492) Die **Grenze der Spannung,** bis zu der die Motoren rationell gebaut werden können, liegt bei kleinen Typen bis etwa 10 kW bei 500 V, bei mittleren Typen bis etwa 30 kW bei 3 kV und bei großen Typen bei 7 bis 10 kV. Sie ergibt sich aus dem Anwachsen einmal des für Isolation erforderlichen Raumes — in der Hinsicht sind Motoren mit geringer Nutenzahl für hohe Spannungen besser geeignet als andere — und aus der größten Zahl dünner Drähte, die man noch durch eine Nut fädeln kann. Bei Motoren für sehr hohe Spannung ist man in der Regel gezwungen, um mit dem Wickelraum auszukommen und dabei vernünftige Abmessungen des Motors einzuhalten, im Wirkungsgrad und Leistungsfaktor etwas schlechtere Werte zuzulassen als bei normalen Spannungen.

(493) Schaltung und Klemmen. Beide Teile können bei Drehstrom nach Belieben Dreieck- oder Sternschaltung erhalten. Die Enden der Wicklung werden zu drei Klemmen geführt, wenn ein für allemal Dreieckschaltung oder Sternschaltung ohne Herausführung des Nullpunktes vorgesehen ist. Bei Herausführung des Nullpunktes ergeben sich vier Klemmen. Soll die Wahl zwischen Dreieck- oder Sternschaltung offen bleiben, wie es bei Motoren für zweierlei Spannung (z. B. 110 und $\sqrt{3} \times 110 \approx 190$ V) vorkommt, so sind sechs Klemmen erforderlich. Bei solchen Motoren wird oft falsch angeschlossen, so daß die Stromrichtung in einem Wicklungszweig die verkehrte ist; in dem Falle laufen die Motoren auch, nehmen aber sehr starke Ströme auf, entwickeln nur ein geringes Drehmoment und brummen in der Regel stark. Man hat daher durch Vertauschen der Anschlüsse an dem betreffenden Zweig die richtige Stromrichtung herzustellen.

Drehstrommotoren sind ohne weiteres durch Vertauschen zweier Zuleitungen umsteuerbar, weil dadurch der Drehsinn des Drehfeldes umgekehrt wird. Zweiphasenmotoren werden durch Vertauschung der Zuleitungen zu einem Wicklungszweig umgesteuert.

Die Anschlußklemmen aller Motoren sollten im normalen Betrieb der Berührung nicht zugänglich sein.

(494) Der Läufer bildet in der Regel den Sekundäranker. Auch die Läufer werden vielfach mit drei Wicklungszweigen ausgeführt (sogenannte Phasenanker); zum Anschluß von Anlaßwiderständen (520) werden drei Punkte der Wicklungen mit Schleifringen verbunden, die entweder zwischen die Motorlager eingebaut oder fliegend angeordnet und dann unter Benutzung einer Bohrung durch die Welle angeschlossen werden (Abb. 258). Es empfiehlt sich, alle Motoren für Dauerbetrieb ohne Umsteuerung mit Bürstenabhebevorrichtung und umlaufender Kurzschlußvorrichtung für die Schleifringe auszuführen (521).

(495) Kurzschlußläufer. Wo ein Anlaßwiderstand entbehrt werden kann, kommen sogenannte Kurzschlußläufer zur Verwendung. Diese werden nach Dobrowolsky als sogenannte Käfiganker (Abb. 242) ausgeführt; ihre Wicklung besteht dann aus Stäben (in der Regel ein Stab je Nut), die an den Stirnseiten des Läufers sämtlich durch je einen Kurzschlußring unmittelbar mit einander verbunden sind. Diese Form stellt die einfachste Wicklung dar und verdient wegen ihrer mechanischen Vorzüge und des geringen Preises die größte Beachtung; ihre Anwendung ist aber beschränkt, weil das Anlassen größerer Motoren mit Kurzschlußläufer Schwierigkeiten macht und Störungen verursacht (517). Die Käfigwicklung ist eine hinsichtlich der Polzahl indifferente Wicklung. Derselbe Läufer paßt daher zu beliebigen Pol-

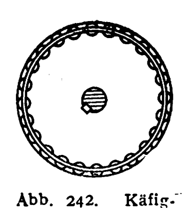


Abb. 242. Käfigwicklung.

zahlen, eine Eigenschaft, die für die Polumschaltung (515, 3) wichtig ist. Es empfiehlt sich, die Eisenkörper der Sekundärteile nicht massiv auszuführen, sondern aus Blechen aufzubauen, weil die Ströme dann nur in den durch die Kupferleiter vorgeschriebenen Bahnen nahe der Peripherie des Läufers auftreten können, wo sie das größte Drehmoment entwickeln.

(496) Die Windungszahl auf dem Sekundäranker kann beliebig gewählt werden. Stabwicklung mit einem oder zwei Stäben in der Nut ermöglicht die beste Ausnutzung des Wickelraumes und ergibt eine sehr solide und sauber aussehende Wicklung, Abb. 219 und 220. Dabei ist zugleich gute Abkühlung zu erreichen; die Wickelköpfe können aber nach Art einer Sirene ein pfeifendes Geräusch hervorbringen. Als ein Nachteil der Stabwicklung ist es anzusehen, daß die Ströme wegen der geringen Windungszahl verhältnismäßig stark ausfallen und daher größere Abmessungen der Schleifringe, Bürsten oder anderer Kontakte und der Verbindungsleitungen zum Anlasser verlangen.

Bei großen Motoren treten bei Stillstand und geringer Drehzahl — auch bei einfacher Stabwicklung — an der Läuferwicklung hohe Spannungen auf, die sowohl hinsichtlich der Isolierfestigkeit als auch mit Rücksicht auf Gefährdung von Personen zu berücksichtigen sind. Die an der offenen Läuferwicklung bei Stillstand auftretende Spannung heißt „Anlaßspannung".

(497) Das Drehfeld bei Mehrphasenstrom[1]. Legt man durch die Achse eines mit Drehstromwicklung versehenen Läufers in beliebiger Richtung eine Ebene, so wird diese auf jeder Seite des Motors eine Anzahl Spulen schneiden. Zählt man die Durchflutungen aller auf einer Seite des Motors geschnittenen Spulen zusammen, so findet man bei guten Wicklungen, daß, wenn man die Schnittebene in beliebiger Richtung um eine Polteilung dreht, in der neuen Stellung genau dieselbe Durchflutung, jedoch mit entgegengesetztem Vorzeichen vorhanden ist. An der einen Stelle treten Induktionslinien aus dem äußeren in den inneren Teil ein, an der anderen Stelle ebensoviel Induktionslinien aus dem inneren in den äußeren aus. Wir können uns dann vorstellen, daß die Durchflutung der an einer Stelle geschnittenen Spulen genau für die eine Weghälfte derjenigen Induktionslinien aufgebraucht wird, die an der Schnittstelle durch die Luft gehen. Sieht man von dem Verbrauch an MMK für den Eisenweg ab, so kommt für die Luft an jedem Zahn die Durchflutung zur Geltung, die bei einem durch diesen Zahn und die Wicklung an dieser Stelle geführten Schnitt in den geschnittenen Spulen vorhanden ist, Abb. 243. Unter dieser Voraussetzung kann man leicht die auf jeden Zahn entfallende Durchflutung bestimmen.

Ein Beispiel bei vierfachen Nuten ($\sigma = 4$) nach Abb. 243 möge dies deutlich machen. Die Durchflutung der geschnittenen Spulen beträgt:

Zahn Nr.	Durchflutung	Zahn Nr.	Durchflutung
1	$4a$	8	$a+4b$
2	$4a+b$	9	$4b$
3	$4a+2b$	10	$4b+c$
4	$4a+3b$	11	$4b+2c$
5	$4a+4b$	12	$4b+3c$
6	$3a+4b$	13	$4b+4c$
7	$2a+4b$	14	$3b+4c$

[1] Literatur: Görges, D. Berechnung d. EMK von Mehrphasen- u. Einphasenwicklungen. ETZ 1907, S. 1. — Kummer, Vergl. Berechnung des Magnetisierungsstromes von Mehrphasen- u. Einphasen-Wicklungen auf Grund d. Feldstärke-Diagramms von Görges u. d. Drehfeld-Zerlegung in Harmonische. ETZ 1907, S. 645. — R. E. Hellmund, D. Differentialfelder im Drehfelde. ETZ 1909, S. 841 u. Graph. Behandlung d. Streuung in Induktionsmotoren. ETZ 1909, S. 25. — Kloss, D. Berechnung d. Magnetisierungsstromes von Drehstrommotoren. El. u. Maschb. Wien 1910, S. 857. — Rasch, Über die Anwendung d. Görgesschen Diagramms auf Teillochwicklungen. ETZ 1912, S 7.

Dabei bezeichnen a, b, c die auf eine Nut entfallende Durchflutung der drei Stromkreise des Drehstroms. Die Polteilung enthält in diesem Falle 12 Nuten. Man erhält z. B. als Durchflutung für Zahn 2: $(4a+b)$, für Zahn 14: $(3b+4c)$ oder, da $(a+b+c)=0$, $-(4a+b)$ AW.

Die einzelnen Durchflutungen lassen sich leicht graphisch darstellen, wenn man annimmt, daß sich die einzelnen Stromstärken sinusartig ändern. Es mögen OA, OB, OC, Abb. 244, die drei Stromstärken und zugleich die Durchflutungen $4a$, $4b$, $4c$ (allgemein σa, σb, σc) darstellen. Zeichnet man nun das regelmäßige Sechseck $AFBDCE$, teilt die Seiten in je vier (allgemein je σ) gleiche Teile und zieht von O aus die Radienvektoren nach den Teilpunkten, so stellen diese Vektoren der Größe und Phase nach die auf jeden Zahn entfallenden Durchflutungen dar, so z. B. der Vektor OA die für Zahn 1, $O2$ die für Zahn 2, $O3$ die für Zahn 3.

Der Scheitelwert von a, b, c ist $\frac{1}{\sigma}\cdot\frac{m}{3}\cdot\sqrt{2}I$, wenn m die Windungszahl eines Polpaares und σ die Zahl der Zähne für Pol und Zweig ist. Die Vektoren OA, OB, OC haben daher, wenn sie Durchflutungen bedeuten, den Zahlenwert

$$\frac{m}{3}\cdot\sqrt{2}I=\frac{\sqrt{2}}{3}\cdot mI.$$

Man kann hieraus die Verteilung des Magnetfeldes in jedem Augenblicke feststellen. Man halte die Zeitlinie in einer beliebigen Lage fest und projiziere alle Vektoren auf die Zeitlinie, so sind die Projektionen den augenblicklichen Werten des magnetischen Feldes von Zahn zu Zahn proportional. Geht die Zeitlinie durch eine der Ecken des Sechsecks, so erhält man für die Darstellung der Verteilung über einer Abszissenachse, die den Umfang des Motors darstellt, die spitze Treppenform (Abb. 245a); steht die Zeitlinie senkrecht auf einer der Seiten, so erhält man die flache Treppenform (Abb. 245c). Dazwischen kann man leicht die Übergänge konstruieren. Man erkennt dann, daß das magnetische Feld während einer Periode um die doppelte Polteilung (2τ) fortschreitet.

+b −a +c −b +a −c
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 1

Abb. 243. Drehstromwicklung mit vierfachen Nuten.

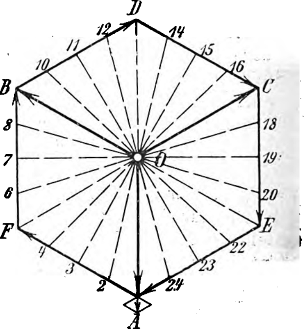


Abb. 244. Vektordiagramm der Feldverteilung einer Drehstromwicklung.

Die Amplitude der augenblicklichen Durchflutung schwankt zwischen zwei Werten hin und her; der größere Wert $\sqrt{2}\cdot mI/3=0{,}471\,mI$ wird immer dann erreicht, wenn die Zeitlinie mit einem der Stromvektoren in gleiche Richtung fällt und einen Grenzzahn zwischen zwei Wicklungsabteilungen trifft, die kleinere $\sqrt{2}\cdot mI\cos 30^\circ/3=0{,}408\,mI$, wenn die Zeitlinie den mitten zwischen zwei Grenzzähnen liegenden Zahn trifft, falls ein solcher vorhanden ist. Die Amplitude der Schwankung ist von der Zahl der Zähne für Pol und Stromzweig unabhängig; sie ist bei Drehstrommotoren kleiner $(2:\sqrt{3})$ als bei Zweiphasenmotoren $(2:\sqrt{2})$, weil bei letzteren im Diagramm statt des Sechsecks ein Quadrat erscheint.

(498) Die magnetische Induktion. Ist die Sättigung im Eisen gering, so ist der größte Wert der magnetischen Induktion bei Drehstrom in der Luft unter den Grenzzähnen

$$\mathfrak{B} = \frac{0,4\pi\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{mI}{\delta} = 0,5924 \cdot \frac{mI}{\delta},$$

wenn δ die Länge der einfachen Luftstrecke zwischen Ständer und Läufer in cm ist. Hieraus folgt umgekehrt für die erforderliche Durchflutung

$$mI = \frac{3}{0,4\pi\sqrt{2}} \cdot \delta\mathfrak{B} = 1,69 \cdot \delta\mathfrak{B}.$$

Zu mI kommt noch der für den Verlauf der Induktionslinien in den Eisenkörpern aufzuwendende Betrag hinzu, der geometrisch zu addieren ist. Die Summe ergibt die gesamte Durchflutung.

Der aus einem Pol austretende Gesamtinduktionsfluß variiert zeitlich nur sehr wenig. Man kann, wenn man einfache Nuten, die bei Motoren nicht angewendet werden dürfen, ausschließt, mit genügender Genauigkeit setzen bei Drehstrom:

$$\Phi = 1,74 \cdot \sigma \Phi_z,$$

bei Zweiphasenstrom:

$$\Phi = \sigma \cdot \Phi_z.$$

Φ_z ist der maximale Induktionsfluß in einem Grenzzahn.

Hieraus ergibt sich der Induktionsfluß im Kranz zu $^1/_2\,\Phi$.

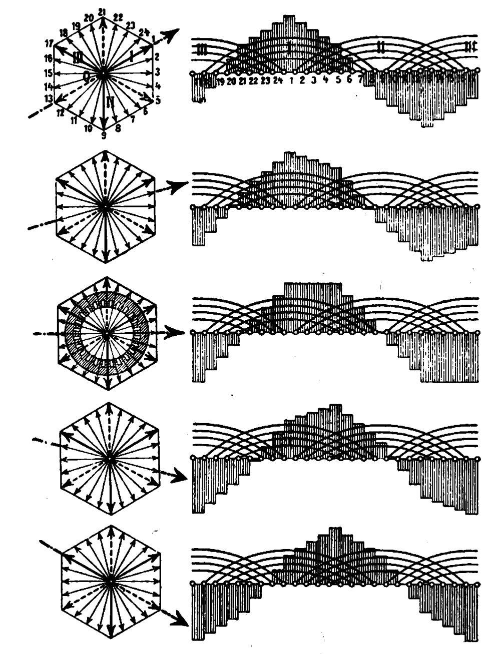


Abb. 245 a bis e. Fortschreiten des Drehfeldes und Übergang von spitzer in flache Form und umgekehrt während T/6.

Bei starker Sättigung der Zähne sind die magnet. Induktionen den Feldstärken nicht genau proportional, die Unterschiede zwischen der magnet. Induktion unter den Grenzzähnen und der unter den mittleren Zähnen werden also geringer.

Von Einfluß sind natürlich auch die Nutenformen und das Verhältnis der Zahl der Nuten auf dem Primäranker zu der auf dem Sekundäranker, weil die obige Ableitung gleichförmigen magnetischen Widerstand über den ganzen Ankerumfang voraussetzt und diese Gleichförmigkeit durch die Nutung beeinträchtigt wird.

(499) Die EMK. Um die in einer Drehstrom-Sechsphasenwicklung durch das Drehfeld induzierte EMK zu berechnen, muß man eine Annahme über die Verteilung der magnetischen Induktion machen. Wir nehmen an, daß auch die Dichte $\mathfrak{B}$ der aus den einzelnen Zähnen austretenden Induktionslinien durch das Vektordiagramm (Abb. 244) dargestellt werde, obwohl infolge der Sättigung, wie eben bemerkt, eine geringe Abweichung eintreten wird. Es sei Φ_z das Maximum des

Induktionsflusses, der aus einem der Grenzzähne austritt, und $\mathfrak{B}$ die zugehörige Induktion in der Luft, E die EMK für Polpaar und Zweig. Dann ist bei σ-fachen Nuten, wenn S die wirksame Oberfläche eines Polpaares ist,

für Drehstrom: $\Phi_z = \frac{S}{6\sigma}\mathfrak{B}$,

$$E = \frac{\sqrt{2}\pi}{3} \cdot C_3 \cdot f m \sigma \Phi_z \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$= 0{,}247\, C_3 \cdot f m S \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} \text{ Volt},$$

für Zweiphasenstrom:

$$\Phi_z = \frac{S}{4\sigma}\mathfrak{B},$$

$$E = \frac{\pi}{2} \cdot C_2 \cdot f m \sigma \Phi_z \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$= 0{,}393\, C_2 \cdot f m S \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}.$$

σ	C_3	C_2
1	2,000	2,000
2	1,750	1,500
3	1,705	1,409
4	1,688	1,375
5	1,681	1,360
6	1,677	1,352
7	1,672	1,347
⋮	⋮	⋮
∞	1,667	1,333

Die EMKe werden durch Streuung etwas vergrößert.

C_3 und C_2 lassen sich in geschlossener Form darstellen (ETZ 1907, S. 1), sind aber am besten aus obenstehender Tabelle zu entnehmen.

Ist ein bestimmtes E vorgeschrieben, so kann man nach diesen Formeln Φ_z und daraus $\mathfrak{B}$ berechnen.

Bei Dreieckschaltung ist E mit der Anzahl der hintereinander geschalteten Polpaare zu multiplizieren, um die gesamte EMK zu erhalten; bei Sternschaltung ist außerdem noch mit $\sqrt{3}$ zu multiplizieren.

(500) Streuung zwischen den Zähnen. Die magnetische Streuung zwischen zwei benachbarten Zähnen ist der magnetischen Potentialdifferenz zwischen ihnen proportional, und deren Scheitelwert wird im Diagramm, Abb. 244, durch die Abschnitte auf den Seiten des Sechsecks (oder Quadrats bei Zweiphasenstrom) dargestellt. Solange nun die magnetische Sättigung das Diagramm nicht verzerrt, ist der Maximalwert der Streuung von Zahn zu Zahn konstant, auch hat eine Anzahl von Streuflüssen immer dieselbe Phase, und nur an den 6 Grenzstellen tritt innerhalb eines Polpaares ein Sprung in der Phase um je 60° auf. Die Zähne, in die der Phase und Größe nach ein ebensolcher Streufluß aus- wie eintritt, werden durch die Streuung nicht stärker belastet. Es werden also nur die Grenzzähne, die sich zwischen zwei Wicklungsabteilungen befinden, z. B. 1, 5, 9 ... in Abb. 243 infolge von Streuung magnetisch stärker belastet. Ist der Streufluß von Zahn zu Zahn Φ_s, ein Wert, der sich berechnen läßt, sobald der Widerstand des Streuflusses zwischen zwei benachbarten Zähnen bekannt ist, so sind die Grenzzähne durch Streuung um die geometrische Summe zweier Streuflüsse Φ_s, die 120° Phasenverschiebung gegeneinander haben, also um Φ_s stärker belastet, als sie es ohne Streuung wären.

(501) Berechnung der Streuung. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen zwei Zähnen ist bei Drehstrom $0{,}4\pi \cdot m/(3\sigma) \cdot \sqrt{2} I = 0{,}59 \cdot mI/\sigma$. Ist $\mathfrak{R}_s$ der magnetische Widerstand des Streuflusses zwischen zwei einander benachbarten Zähnen, so ist der Streufluß selbst

$$\Phi_s = \frac{0{,}4\pi\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{mI}{\sigma \mathfrak{R}_s} = 0{,}59 \cdot \frac{mI}{\sigma \mathfrak{R}_s}.$$

Dieser Streufluß umschlingt alle Windungen eines Zweiges zweimal, daher ist für einen Zweig und ein Polpaar die EMK der Streuung

$$E_s = 2 \cdot \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot \frac{m}{3} \Phi_s \cdot 10^{-8} = 1{,}76 \cdot \frac{f m^2 I}{\sigma \mathfrak{R}_s} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}.$$

Aus (499) ergibt sich ferner für Drehstromwicklung das Verhältnis

$$\tau = \frac{E_s}{E} = \frac{12\,\delta}{C_3\,\sigma S\,\Re_s},$$

worin τ der Heylandsche Streuungskoeffizient ist (327).

Die letzte Gleichung läßt den Einfluß der Nutenzahl erkennen. Unter der Annahme, daß $\Re_s$ konstant gehalten wird, gilt für τ folgende Tabelle:

σ	1	2	3	4	5	6	7
τ in %	100	57,2	39,1	29,7	23,8	19,9	17,1

d. h. die Streuung nimmt mit wachsender Nutenzahl stark ab.

Wegen Berechnung von $\Re_s$ vgl. (383).

(502) Wirkungsweise der Mehrphasenmotoren. Die Winkelgeschwindigkeit des magnetischen Feldes sei w_0, die des Läufers w. Ihre Differenz heißt die Schlüpfung, auch der Schlipf. Bei p Polpaaren ist

$$w_0 = \frac{2\pi f}{p}, \qquad w = \frac{2\pi n}{60}, \qquad w_s = w_0 - w. \tag{1}$$

Häufig wird die Schlüpfung in Bruchteilen von w_0 angegeben, also

$$s = \frac{w_0 - w}{w_0} = \frac{w_s}{w_0}. \tag{2}$$

s ist die relative Geschwindigkeit zwischen dem umlaufenden Feld und dem Läufer. Die im Sekundäranker induzierte EMK ist der Schlüpfung und dem sekundären Induktionsfluß Φ_2 proportional:

$$E_2 = c \cdot \Phi_2 (w_0 - w) = c\,\Phi_2 w_s. \tag{3}$$

Wenn der Anker kurz geschlossen ist, so ist die Stromstärke

$$I_2 = \frac{c}{R_2}\,\Phi_2\,(w_0 - w) = \frac{c}{R_2}\,\Phi_2 w_s, \tag{4}$$

wobei alle Größen auf einen Wicklungszweig zu beziehen sind. Ihr entspricht die Stromwärmeleistung

$$W_2 = E_2 I_2 = R_2 I_2^2 = \frac{c^2}{R_2}\,\Phi_2^2 (w_0 - w)^2 = \frac{c^2}{R_2}\,\Phi_2^2 w_s^2. \tag{5}$$

Sie wird durch die mechanische Leistung $D w_s$ erzeugt, worin D das Drehmoment ist. Es ist also

$$D w_s = \frac{c^2}{R_2}\,\Phi_2^2 w_s^2,$$

woraus

$$D = \frac{c^2}{R_2}\,\Phi_2^2 w_s = c\,\Phi_2 I_2 \tag{6}$$

folgt. Das Drehmoment ist also der Schlüpfung und dem Quadrat des Induktionsflusses im Sekundäranker proportional.

Das Produkt $D w$ stellt die tatsächlich vom Läufer abgegebene mechanische Leistung N_{mech} dar, von der noch die Reibungsverluste abzuziehen sind, um die Nutzleistung zu erhalten; das Produkt $D w_s$ die zur Stromwärme verbrauchte Leistung W_2. Es ist also

$$N_{mech} = D w = \frac{c^2}{R_2}\,\Phi_2^2 (w_0 - w)\,w = \frac{c^2}{R_2}\,\Phi_2^2 w w_s, \tag{7}$$

und es verhält sich

$$\frac{W_2}{N_{mech}} = \frac{w_0 - w}{w} = \frac{w_s}{w}, \tag{8}$$

und, wenn N_2 die gesamte dem Anker zugeführte Leistung ist,

$$\frac{W_2}{N_2} = \frac{w_0 - w}{w_0} = \frac{w_s}{w_0} = s \text{ und } \frac{N_{mech}}{N_2} = \frac{w}{w_0}. \tag{9}$$

Die relative Schlüpfung s ist daher gleich dem relativen Leistungsverlust durch Stromwärme im Sekundäranker. Dies Resultat gilt genau nur bei einem vollkommenen Drehfeld; ist es unvollkommen, so ist der Verlust größer, als sich aus der Schlüpfung ergibt. Beim Einphasenmotor ist der Verlust bei normalem Betrieb nahezu doppelt so groß, (528) und (543).

Gl. 6) zeigt, daß zur Erzielung desselben Drehmomentes bei konstantem Φ_2 (konstanter Primärspannung) die Schlüpfung proportional dem Ankerwiderstand sein muß. Vergrößerung des Ankerwiderstandes vergrößert also die Schlüpfung bis zum Stillstand des Motors ohne Beeinträchtigung des Drehmomentes. Daraus ergibt sich das Anlassen und die Geschwindigkeitsregelung durch Einschaltung von Widerständen in den Sekundärkreis.

(503) Heylandsches Kreisdiagramm[1]. Nach (2) und (6) kommt der Motor ohne wesentliche Änderung der magnetischen und elektrischen Vorgänge zur Ruhe, wenn der Widerstand im Sekundärkreise von R_2 auf $\frac{R_2}{s}$ vergrößert wird. Er verhält sich dann wie ein Transformator mit großer Streuung (331). Es seien der primäre Induktionsfluß $\Phi_1 = OA$, Abb. 246, und also auch die primäre EMK E_1 konstant. Die primäre Klemmenspannung P_1 wird sich dann etwas, jedoch nur wenig ändern. Setzt man $\varphi_2 = 0$ und vernachlässigt man H_2, d. h. die Eisenverluste im Läufer, so geht Abb. 139 in Abb. 246 über, und $\sphericalangle OQI$ wird ein Rechter. Der Schnittpunkt der Verlängerung von QI mit Φ_1 sei B. Zieht man IC parallel QO, AF parallel IO und FD parallel OQ, so läßt sich nachweisen, daß D, B und C feste Punkte auf AO sind. Daher müssen Q, I und F auf Kreisen über BO, BC und BD als Durchmessern liegen. Wählt man M so, daß ΔMAI ähnlich $\Delta M'A'O$, so ist MI parallel und proportional zu $M'O$ und FI parallel und proportional zu $F'O$; MI stellt daher I_1 und FI bei gleichen Windungszahlen im Sekundär- und Primärkreise I_2 in demselben Maße dar. Auch QI und BI sind I_2 proportional. Gewöhnlich werden nur die Kreise über BC und BD gezeichnet und E_1 und P_1 von M aus eingetragen, Abb. 247. E_1P_1 ist parallel zu MI und gleich R_1I_1; P_1 bewegt sich auf einem Kreise, dessen Lage zu E_1 ähnlich der Lage des Kreises über BC zu M ist. $\sphericalangle P_1MI$ ist gleich der primären Phasenverschiebung φ_1. Bei Leerlauf fällt I mit I_λ, bei Stillstand mit I_k zusammen.

(504) Streuungskoeffizienten. Hält man, Abb. 246, die Zeitlinie in der Richtung senkrecht zum Vektor I_2 fest, so rührt der Induktionsfluß nur von I_1 her, hält man sie in der Richtung senkrecht zum Vektor I_1 fest, so rührt der Induktionsfluß nur von I_2 her. Man erhält daraus einerseits Φ_1' und Φ_2', andererseits Φ_2'' und Φ_1'', vgl. (327). Es war aber

$$\nu_1 = \frac{\Phi_1'}{\Phi_2'} \quad \text{und} \quad \nu_2 = \frac{\Phi_2''}{\Phi_1''}.$$

[1] Literatur: Heyland, Eine Methode zur experimentellen Untersuchung an Induktionsmotoren. Voitsche Samml. 1905. — Berkitz-Behrend, Induktionsmotoren. Berlin, Krayn, 1903. — Heubach, D. Drehstrommotor. Berlin, Springer, 1903. — Emde, D. Arbeitsweise d. Wechselstrommaschinen. Berlin, Springer, 1902. — Ossanna, Theorie der Drehstrommotoren. Z. f. El. 1899, S. 223. — Sumec, Kreisdiagramm des Drehstrommotors bei Berücksichtigung des primären Spannungsabfalls (Ossanna). Z. f. El. 1901, S. 177. — Außerdem Lehrbücher.

Man erhält daraus, wenn man noch die primären Eisenverluste gleich Null setzt also die primäre Stromstärke durch AI, nicht durch MI darstellt,

$$\nu_1 = \frac{\varrho + \varrho_1}{\varrho_1} = \frac{DC}{BC}, \quad \tau_1 = \frac{\varrho}{\varrho_1} = \frac{DB}{CB},$$

$$\nu_2 = \frac{\varrho + \varrho_2}{\varrho_2} = \frac{AC}{DC}, \quad \tau_2 = \frac{\varrho}{\varrho_2} = \frac{AD}{DC},$$

$$\sigma = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2} = \frac{AB}{AC}.$$

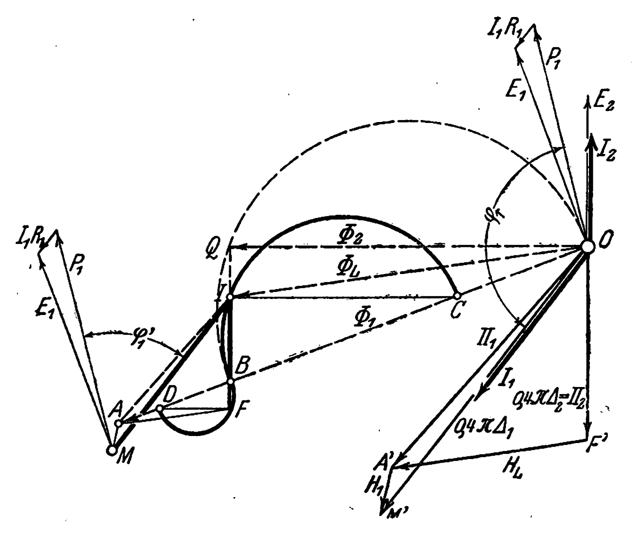


Abb. 246. Geometrische Örter des allgemeinen Transformators.

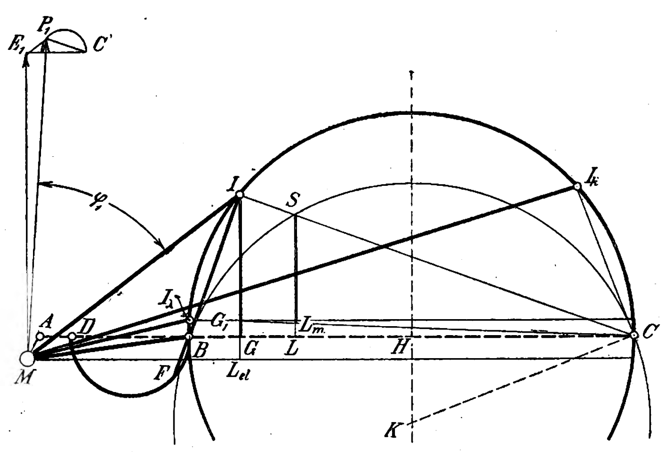


Abb. 247. Modifiziertes Heylandsches Diagramm.

(505) Primärer Leistungsfaktor. Angenähert läßt man wohl M mit A zusammenfallen, d. h. man vernachlässigt die primären Magnetisierungsverluste. Dann wird I_1 durch AI dargestellt. Vernachlässigt man auch $I_1 R_1$, so fällt P_1 mit E_1 zusammen. In diesem Falle wird der Maximalwert von $\cos \varphi_1$ gleich $(1-\sigma)/(1+\sigma)$, ein Wert, der demnach nur angenähert gilt.

(506) Schlüpfung. Nach (502) Gl. 4 kann man $I_2 R_2$ proportional mit $\Phi_2 \cdot s$ setzen. Andererseits ist Φ_2 mit CI proportional, daher $I_2 R_2$ proportional mit $s \cdot CI = SI$. Diese Strecke tragen wir von I aus auf IC ab, Abb. 247. Da BI und, wie eben bemerkt, SI proportional mit I_2 sind, so ist SI/BI = konst., also $\sphericalangle SBI$ konstant und, da $\sphericalangle BIS = 90°$, auch $\sphericalangle BSI$ konstant. Demnach liegt S auf einem Kreise, der durch B und C geht und seinen Mittelpunkt in K hat. Bei Stillstand rückt I nach I_k. Dabei wird $s = 1$, also $SI_k/CI_k = 1$, d. h. S fällt mit C zusammen. Die Strecke CI_k ist daher Tangente an dem Schlüpfungskreise in C, und K liegt daher auf der in C zu CI_k gezogenen Senkrechten. Die Schlüpfung ist $s = SI/CI$.

(507) Drehmoment. Nach (502) Gl. (6) kann man das Drehmoment proportional mit $QB \cdot QO$, Abb. 246, oder $BI \cdot CI$, Abb. 246 und Abb. 247, setzen. Da die Grundlinie BC des Dreiecks BCI konstant, so mißt die Höhe IG das Drehmoment. Zieht man hiervon einen konstant angenommenen Betrag GG_1 für Überwindung der Reibung ab (MI_λ = Leerlaufstromstärke, G_1 auf der Parallelen durch I_λ zu AC), so ist IG_1 das nützliche Drehmoment. Das größte Drehmoment wird erreicht, wenn I auf der Mittelsenkrechten von BC liegt; bei noch größerer Schlüpfung wird D wieder kleiner, während I_1 und I_2 weiter wachsen. Der größte Wert von D ist

$$D_{max} = \frac{I_\lambda \cdot E_1}{9{,}81 \cdot w_0} \cdot \frac{1-\sigma}{2\sigma} \text{ kg*m}. \tag{7}$$

(508) Drehmomente der Hysterese und der Wirbelströme. Die Verluste durch Hysterese V_h und durch Wirbelströme V_w im Läufereisen sind

$$V_h = c \cdot \eta\, \mathfrak{B}_{max}^{1,6} f_2 = c_1 \cdot s\,, \qquad V_w = C \cdot \beta\, \mathfrak{B}_{max}^{2} f_2^2 = C_1 s^2\,, \tag{1}$$

wenn f_2 die der Schlüpfung s proportionale Frequenz des Läuferfeldes ist. Erteilt man dem ganzen Motor eine Drehung gleich und entgegengesetzt der Rotation des magnetischen Feldes, so kommt dieses zum Stillstand, und das Läufereisen dreht sich mit einer der Schlüpfung s proportionalen Geschwindigkeit. Die dazu aufzuwendenden mechanischen Leistungen sind

$$N_h = c_2 \cdot D_h s\,, \qquad N_w = C_2 \cdot D_w s\,. \tag{2}$$

Der Vergleich von 1) und 2) zeigt, daß

$$D_h = c_1/c_2 = \text{const}\,, \qquad D_w = (C_1/C_2)s = \text{const} \cdot s$$

ist. Das Drehmoment der Hysterese ist daher von der Schlüpfung s der Größe nach unabhängig, es wechselt jedoch mit s sein Vorzeichen und springt daher beim Durchschreiten des Synchronismus von einem konstanten positiven zu einem ebenso großen konstanten negativen Werte. Dagegen ist das Drehmoment der Wirbelströme genau wie das der Ströme in der Läuferwicklung proportional mit der Schlüpfung (vgl. Lehmann, ETZ 1910, S. 1249, hier auch weitere Literaturangaben). Dies gilt nur bei glatten Zylindern, bei genuteten Eisenkernen treten starke Abweichungen von den einfachen Gesetzen ein.

(509) Leistung. Die gesamte mechanische Leistung N_{ges} würde proportional mit IG sein, wenn keine Schlüpfung vorhanden wäre. Die Schlüpfung verkleinert die Gesamtleistung im Verhältnis $CS : CI$, die Reibungsleistung im Verhältnis $GG_1 : LL_m$ (L_m auf $G_1 C$), so daß

$$N_{ges} = c \cdot SL \text{ und } N_m = c \cdot SL_m\,, \tag{8}$$

worin N_m die Nutzleistung. Zieht man noch durch M eine Parallele zu AC, so stellt das Lot IL_{el} die elektrische Leistung abzüglich der vernachlässigten Eisenverluste im Sekundäranker und der primären Stromwärme dar, weil IL_{el} gleich der Leistungskomponente von I_1. Demnach ist der Wirkungsgrad [m_l siehe (510)]

$$(9) \qquad \eta = \frac{m_l \cdot SL_m}{m_l \cdot IL_{el} + I_1^2 R_1},$$

wenn man alles auf einen Wicklungszweig bezieht.

Die Lage von M ist tatsächlich nicht völlig fest, sondern M rückt wegen der zusätzlichen Verluste mit zunehmender Belastung mehr und mehr nach unten, so daß der Abstand der durch M gezogenen Parallelen zu AC von dieser Geraden wächst.

(510) Maßstäbe für das Diagramm. Man bezieht am besten alle Größen auf einen Wicklungszweig. Sind die Maßstäbe für E_1 und I_1 durch m_e und m_i festgelegt, etwa in V/mm und A/mm, so folgt aus

$$E_1 = m_e \cdot ME_1, \quad I_1 = m_i \cdot MI,$$

$$(10) \quad N_{e1} = m_l \cdot IL_{el} = E_1 I_1 \cdot \cos(E_1 I_1) = E_1 \cdot m_i \cdot MI \cdot \cos(E_1 I_1) = E_1 m_i \cdot IL_{el}.$$

(11) Daher $m_l = E_1 m_i$ als Maßstab für N_1 in Watt/mm.

Der Maßstab für N_m in P ist $\frac{m_l}{736}$ P/mm, für das Drehmoment in kg*m

$$(12) \qquad m_d = \frac{m_l}{9{,}81 \cdot w_0} = \frac{E_1 m_i}{9{,}81 \cdot w_0} \frac{\text{kg*m}}{\text{mm}}.$$

Bei Stillstand ist $E_2 = R_2 I_2 = m_2 \cdot IC$, bei laufendem Motor ist E_2 im Verhältnis IS/IC kleiner. Hieraus ergibt sich, wenn m_1 und m_2 die Windungszahlen sind,

$$(13) \qquad R_2 = \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 \cdot \frac{E_1}{CD} \cdot \frac{IS}{m_i \cdot FI}.$$

Man kann diese Gleichung vorteilhaft zur Berichtigung des Diagramms benutzen, indem man D in der Mitte von AB annimmt.

(511) Reduktion auf konstante Spannung. Da das Kreisdiagramm für konstante EMK abgeleitet ist, gewöhnlich aber die Spannung am Motor konstant gehalten wird, sind die aus dem Diagramm abgegriffenen Größen auf konstante Spannung zurückzuführen. Winkel und Schlüpfung bleiben dabei ungeändert, Spannungen, Stromstärken, Induktionsflüsse ändern sich im einfachen, Drehmomente und Leistungen im quadratischen Verhältnis mit E_1. Zwischen E_1 und P_1 bestehen die Näherungsformeln

$$E_1 = P_1 - \frac{R_1}{P_1} \cdot N_1 \quad \text{und} \quad P_1 = E_1 + \frac{R_1}{E_1} \cdot N_1,$$

wenn alle Größen auf einen Zweig bezogen werden, N_1 also den dritten Teil der ganzen elektrischen Leistung bedeutet.[1]

(512) Herstellung des Diagramms durch Rechnung. Man trage ME_1 vertikal nach oben auf, berechne für die entsprechende Magnetisierung die Komponenten des Teiles MA von I_1, der zur Magnetisierung des Ständers notwendig ist, und trage die Leistungskomponente parallel zu ME_1, die Leerkomponente rechtwinklig dazu nach rechts an. Man erhält dadurch A und die Richtung von AC. Die für die Durchmagnetisierung der Luft erforderliche Komponente von I_1 ist gleich AB. Man berechne nun σ (501 u. 327) und $AC = AB/\sigma$. Der Kreis über BC kann nun

[1]) Ossanna hat ein Diagramm für konstante Spannung auf rechnerischer Grundlage angegeben, vgl. Z. f. El. 1899, S. 223 und Z. f. El. 1901, S. 177.

geschlagen werden. Aus der für eine bestimmte Belastung festgesetzten Schlüpfung ist dann Punkt S zu konstruieren und durch BSC der Schlüpfungskreis zu legen. Für die Schlüpfung sind Gl. 5 und 7 in (502) maßgebend.

(513) Herstellung des Diagramms auf Grund von Versuchen. Werden I_1, P_1 und N_1 bei synchronem Leerlauf (Antrieb durch fremden Motor bei offenem Sekundärkreis), ferner bei normalem Leerlauf, endlich bei Stillstand (Motor bei verringerter Spannung festgebremst, Mittelwerte bei verschiedenen Stellungen nehmen) gemessen, so kann man nach Festlegung des Vektors E_1 die Punkte B, $I\lambda$, I_k konstruieren, indem man I_1 auf konstantes E_1 (511) reduziert. Dadurch sind der Kreis über BC, ferner die Strecke ABC rechtwinklig zu ME_1 und die zu ihr parallelen Geraden durch $I\lambda$ und M festgelegt. Der Mittelpunkt des Schlüpfungskreises ergibt sich als Schnitt der Mittelsenkrechten auf BC mit der Parallelen zu BI_k durch C. Die Lage von C kann man durch (510) Gl. 13 berichtigen.

(514) Einfluß der Polzahl und der Frequenz. Die Drehzahl n hängt von der Polpaarzahl p und der Frequenz f ab, denn bei Synchronismus ist $n_0 = 60\,f/p$. Die Drehzahlen n_0 ergeben sich daher aus der folgenden Tabelle.

p	n_0 für		p	n_0 für	
	$f=25$	$f=50$		$f=25$	$f=50$
1	1500	3000	24	62,5	125
2	750	1500	28	53,5	107
3	500	1000	32	46,9	93,8
4	375	750	36	41,7	83,3
6	250	500	40	37,5	75,0
12	125	250			

Bei Leerlauf stimmen die Geschwindigkeiten fast genau mit diesen Werten überein, bei Belastung sind sie um die Schlüpfung geringer.

Motoren für mehr als 3000 U/min (z. B. für Holzbearbeitungsmaschinen) verlangen eine höhere Frequenz als 50; in der Regel sind niedrigere Drehzahlen erwünscht und daher die kleinsten normalen Motoren bei 50 Per/s vierpolig.

Die Winkelgeschwindigkeit w_0 des Drehfeldes bleibt ungeändert, wenn die Polzahl $2p$ und die Frequenz f proportional zueinander geändert werden. Betreibt man denselben Motor mit verschiedenen Frequenzen, so läuft er entsprechend schneller oder langsamer.

(515) Änderung der Umlaufzahl. Soll bei konstanter Frequenz die Drehzahl verändert werden, so stehen dazu folgende Mittel zur Verfügung.

1. V e r g r ö ß e r u n g d e r S c h l ü p f u n g d u r c h E i n s c h a l t e n v o n W i d e r s t a n d i n d e n S e k u n d ä r a n k e r. Dies ist mit einfachen Mitteln bei jedem Motor mit Phasenanker ausführbar, sobald Schleifringe vorhanden sind, verursacht aber starke Verluste durch Stromwärme im Regulierwiderstand und ergibt eine bestimmte Einstellung nur für eine bestimmte Belastung. Wird der Motor entlastet, so läuft er schneller, und wird er belastet, langsamer. Abb. 248 zeigt die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Schlüpfung bei verschiedenen Widerständen im Sekundäranker. Die Abszissen stellen darin die Drehzahlen in Prozent der Drehzahl bei Synchronismus, die Ordinaten die Drehmomente dar.

2. H e r s t e l l u n g e i n p h a s i g e r W i c k l u n g i m S e k u n d ä r a n k e r. Öffnet man bei Drehstrom einen Stromzweig (z. B. durch Abheben einer Bürste), so fällt der Motor bei stärkerer Belastung aus der normalen auf die halbe Drehzahl, beim Anlaufen erreicht er nur die halbe Drehzahl. Bei Überschreitung der halben Drehzahl läuft er als Generator. Leistungsfaktor und Wirkungs-

grad sind unbefriedigend, letzterer jedoch größer als bei 50% Schlüpfung nach der ersten Methode. (Vgl. ETZ 1896, S. 517. — W e i d i g, Die Wechselstrominduktionsmasch. mit einachsiger Wicklung. Diss. Dresden 1912.)

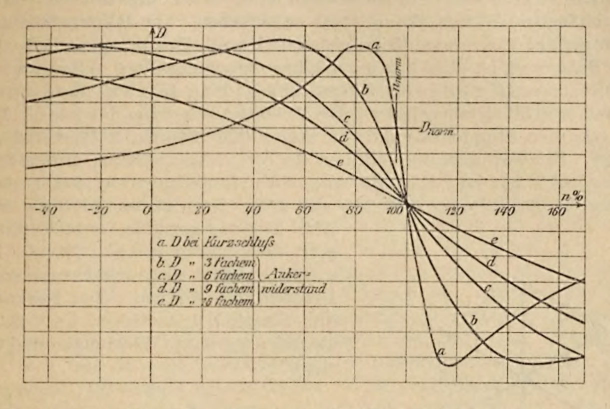


Abb. 248. Drehmomentkurven des Drehstrominduktionsmotors.

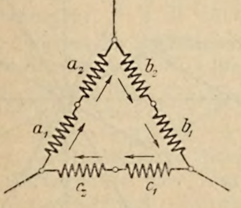


Abb. 249. Polumschaltung: p Pole.

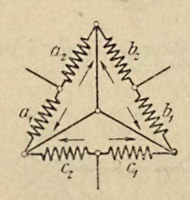


Abb. 250. Polumschaltung: $2p$ Pole.

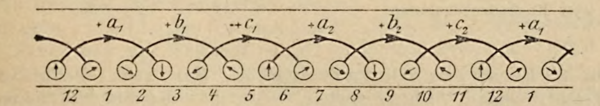


Abb. 251. Stromrichtungen bei der Polumschaltung: p Pole.

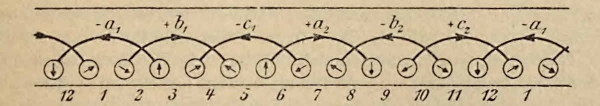


Abb. 252. Stromrichtungen bei der Polumschaltung: $2p$ Pole.

3. P o l u m s c h a l t u n g (B e h n - E s c h e n b u r g, ETZ 1902, S. 1055, ETZ 1903, S. 1004. — S c h n e t z l e r, ETZ 1909, S. 320. — S c h n a c k e n b u r g, El. Kr. u. B. 1909, S. 206. — H o e f f l e u r, ETZ 1914, S. 873). Durch

eine Umschaltung der Teile einer Wicklung oder durch Einschaltung der einen oder der anderen von zwei voneinander unabhängigen Wicklungen (H. Peters, ETZ 1914, S. 379), wird die Polzahl auf dem Ständer und unter Umständen auch auf dem Läufer geändert. Am einfachsten ist es, den Läufer mit der von der Polzahl unabhängigen Käfigwicklung (495) zu versehen. Die Polumschaltung verursacht nur geringe Verluste im Motor selbst und ergibt Unabhängigkeit der Drehzahl von der Belastung, ist aber nur bei mäßiger Spannung ohne weiteres ausführbar. Sie wurde zuerst (Krebs) für Ringwicklung, dann (Behn-Eschenburg) für Trommelwicklung ausgeführt. Die Schaltung der von Brown, Boveri u. Cie. gebauten Simplonlokomotiven zeigen Abb. 249 für 2 Pole und Abb. 250 für 4 Pole. Zeichnet man die Vektoren der Ströme in die Nuten bei beiden Schaltungen ein, Abb. 251 und Abb. 252, so erhält man nach dem in (497) geschilderten Verfahren die Diagramme Abb. 253 und 254. Man erkennt, daß die Schaltung Abb. 249 das normale Drehfeld mit 2 Polen gibt, die Schaltung Abb. 250 ein stärkeres entgegengesetzt umlaufendes unregelmäßiges Drehfeld mit 4 Polen. Der Sekundäranker der Simplonlokomotiven hat zwei voneinander getrennte Wicklungen und 6 Schleifringe.

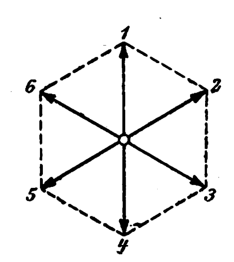


Abb. 253. Vektordiagramm der Polumschaltung: p Pole.

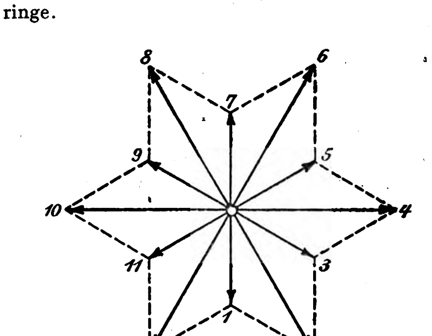


Abb. 254. Vektordiagramm der Polumschaltung: $2p$ Pole.

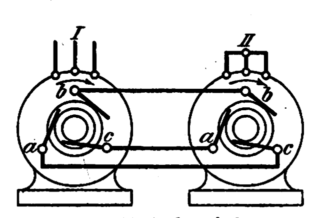


Abb. 255. Kaskadenschaltung.

(516) 4. Kaskadenschaltungen. Man kann die bei dem Verfahren 1 auftretenden Verluste sparen, wenn man die aus dem Sekundäranker entnommene Leistung nützlich verwendet. Dies geschieht durch die Kaskadenschaltungen.

a) Kaskadenschaltung zweier Induktionsmotoren[1]). Im Sekundäranker des Drehstrommotors fließt Drehstrom, dessen Frequenz f_2 der Schlüpfung s proportional ist. Man kann daher mit ihm einen zweiten Motor speisen. Gekuppelt laufen zwei gleiche Motoren in Kaskadenschaltung mit der Hälfte der Geschwindigkeit, die sie für sich allein annehmen würden. Verbindet man, Abb. 255, die beiden gleichgewickelten Läufer miteinander, so kann man die Schleifringe sparen, da man den Anlasser dann in die Ständerwicklung des zweiten Motors einzuschalten hat.

---

[1]) Görges, ETZ 1894, S. 644. — Danielson, ETZ 1902, S. 656 u. 1904, S. 43. — Breslauer, D. Kreisdiagramm des Drehstrommotors u. seine Anwendung auf die Kaskadenschaltung. Voitsche Sammlung 1903. — Cauwenberghe, Beitrag zur allgem. Theorie d. Asynchronmotoren ohne Kollektor. — D. Kaskadenmotor. Diss. Danzig 1909.

Danielson erzielt mit der Kombination zweier Motoren mit verschieden viel Polen vier Geschwindigkeiten, indem er die Motoren einzeln oder in Kaskade benutzt. Näheres siehe vorige Auflage (544).

Die Umschaltung von Normal- auf Kaskadenschaltung wird bei elektrischen Bahnen angewendet, um verschiedene Geschwindigkeiten zu erzielen. Zu beachten ist, daß die Stromstärke im Läufer des ersten Motors jetzt eine Phasenverschiebung gegen die EMK besitzt; für das Drehmoment kommt aber nur die Leistungskomponente in Betracht. Die Beanspruchung des ersten Motors ist daher größer als die des zweiten. Der erste Motor wird daher bei dauernder Kaskadenschaltung zweckmäßig größer als der zweite gebaut.

Kaskadenschaltung gleich gebauter Motoren ergibt geringen Wirkungsgrad und niedrigen Leistungsfaktor. Bei Anwendung besonderer Bauart des zweiten Motors (Hintermotors) läßt sich der Wirkungsgrad und auch der Leistungsfaktor etwas verbessern. In dem Falle ist aber der Hintermotor nur bei Betrieb in Kaskadenschaltung zu benützen und muß im übrigen leer laufen.

b) Regelsätze. Nach von Linsemann, Krämer und Heyland schließt man an die Schleifringe des Motors einen Drehstrom-Gleichstrom-Umformer (554) an und speist mit dem gewonnenen Gleichstrom einen Gleichstrommotor, der mit dem Induktionsmotor direkt gekuppelt ist. Nach Krämer speist man mit den Sekundärströmen des Induktionsmotors einen Drehstromkommutator mit Reguliertransformator in Nebenschlußschaltung (540), der mit dem Hauptmotor direkt gekuppelt ist, während er nach Scherbius einen besonderen synchronen oder asynchronen Drehstromgenerator antreibt, der an das Netz angeschlossen ist. (Meyer, „Die Verwendung verlustlos regelbarer Drehstrommotoren", El. K. u. B. 1911, S. 421).

(517) Anlassen der Drehstrommotoren. Kleine Motoren bedürfen überhaupt keiner Anlaßvorrichtung. Man führt sie dann mit Kurzschlußläufer aus. Beim Einschalten entsteht dann aber ein starker Stromstoß, der nachteilig auf das Netz wirkt. Man kann den Stoß durch einen Stern-Dreieck-Schalter oder einen Anlasser im Primärkreise abschwächen. Zum Anschluß an öffentliche, auch der Beleuchtung dienende Elektrizitätswerke werden Motoren mit Kurzschlußläufer in der Regel nur für kleine Leistungen bis zu etwa 2 kW zugelassen. Ist eine fremde Kraftquelle vorhanden, um den Motor auf synchrone Geschwindigkeit zu bringen, so kann der Kurzschlußläufer für beliebig große Leistungen benutzt werden. Notwendig ist dann, daß der Synchronismus möglichst genau hergestellt werde, weil schon bei geringer Schlüpfung das volle Drehmoment und die volle Stromstärke auftritt.

Zur Abschwächung des Stromes und Erhöhung des Drehmomentes beim Anlaufen kann man die Stromverdrängung benutzen (Rüdenberg, ETZ 1918, S. 483, AEG DRP. 314651), indem man die Läufernuten sehr schmal und tief macht und sie mit einem oder mehreren massiven Stäben versieht, die zu einer Käfigwicklung miteinander verbunden sind. Bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit, also hoher Frequenz im Läufer, werden die Ströme in radialer Richtung nach außen gedrängt, wodurch der Widerstand der Wicklung um ein Bedeutendes wächst und die sekundäre Streuung verringert wird. Der Strom kann dann nicht so stark anwachsen und das Drehmoment wird vergrößert. Solche Kurzschlußläufer dürften für größere Leistungen in Frage kommen, wenn die Motoren ohne wesentliche Belastung anlaufen sollen und das Trägheitsmoment der umlaufenden Teile mäßig groß ist. Im allgemeinen ist bei größeren Motoren eine Anlaßvorrichtung erforderlich, um stoßfreies Einschalten und genügendes Anlaufmoment zu erzielen. Zum Anlassen dienen Widerstände und Umschaltungen.

(518) Anlassen durch Stern-Dreieck-Schaltung. Die Primärwicklung kleinerer Motoren mit Kurzschlußläufer wird mit Hilfe besonderer Schalter beim Anlassen in Stern, sobald sie laufen, in Dreieck geschaltet. Bei der Sternschaltung erhält jeder Zweig nur das $1/\sqrt{3}$-fache der Netzspannung, bei Dreieckschaltung die

volle Netzspannung. Die Stromstärken sind daher beim Anlassen verringert, aber auch das Drehmoment, und zwar, weil der Induktionsfluß nahezu proportional der Spannung ist, nach (502) Gl. 6 auf den dritten Teil.

(519) Anlasser im Primärkreise. Motoren mit Kurzschlußläufer erhalten hin und wieder einen in den Primäranker zu schaltenden Anlasser, bestehend aus einem mit Sparschaltung ausgeführten Transformator (337) mit Anzapfungen und Windungsschalter, (325), oder einem Wasseranlasser. Dabei kann die Fliehkraftkuppelung von Friese angewandt werden, die die Welle erst bei einer bestimmten Geschwindigkeit mit der Riemenscheibe kuppelt (gebaut von den Siemens-Schuckert-Werken). Dieser kann aber nur ein zu starkes Anwachsen der Stromstärke verhindern, wobei zugleich das an sich geringe Anlaufdrehmoment noch verringert wird.

(520) Anlasser im Sekundärkreise. Der Anlasser im Läuferkreis (Abb. 256) erfordert Schleifringe, verbürgt aber größtes Drehmoment beim Anlaufen und normales Drehmoment bei etwa normaler Stromstärke, vgl. Abb. 248. Anlasser im Primäranker und im Sekundäranker werden mitunter gleichzeitig angewendet, um auch in elektrischer Hinsicht ganz stoßfreies Anlaufen zu erzielen.

Abstufung des Anlassers (Görges, ETZ 1894, S. 644; Elektr. Bahnen 1906, S. 249. — Niethammer, ETZ 1900, S. 37). Die Abstufung wird wie in (435) am besten so gewählt, daß jeder Stufe derselbe Sprung in den Stromstärken entspricht. Es sei, Abb. 257, MS die normale, MT die maximale Stromstärke im Primärkreise, BS die normale, BT die maximale Stromstärke im Sekundärkreise. Der Gesamtwiderstand $R_2 + R_a$ im Sekundärkreise (R_2 = Widerstand der Wicklung, R_a = dem des Anlassers) sei zuerst so groß, daß der Motor bei Stillstand die Stromstärke MT aufnimmt. Der zugehörige Schlüpfungskreis berührt CT und hat seinen Mittelpunkt in K_1 wobei $\sphericalangle\ TCK_1 = 90°$. Da das Drehmoment größer als normal ist, setzt sich der Motor in Bewegung, bis $I_1 = MS$ geworden ist. CS schneidet den Schlüpfungskreis in S_1, die Geschwindigkeit ist daher jetzt

Abb. 256. Schaltung des Anlassers bei Induktionsmotoren.

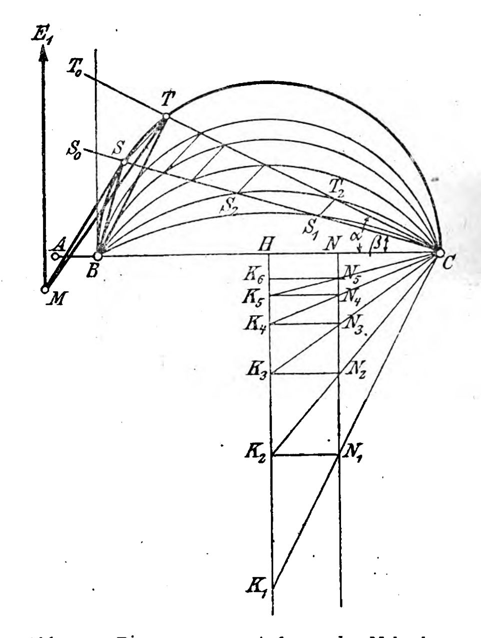


Abb. 257. Diagramm zum Anlasser des Mehrphasenmotors.

proportional mit CS_1/CS und die Schlüpfung gleich S_1S/CS. Springt jetzt durch Abschalten einer Stufe die Stromstärke wieder auf den Wert MT, so ist im ersten Augenblick die Schlüpfung noch ebenso groß wie vorher, also

$$\frac{T_2T}{CT} = \frac{S_1S}{CS}. \tag{1}$$

Es ist also S_1T_2 parallel mit ST zu ziehen und durch B, T_2 und C ein neuer Schlüpfungskreis mit dem Mittelpunkt K_2 zu legen. Bei normaler Stromstärke MS ist die Schlüpfung nunmehr gleich S_2S/CS. Es war aber (506) SS_2 proportional mit $I_2(R_2 + R_a)$ und BS proportional mit I_2. Da nun T_2 und S_2 auf demselben Schlüpfungskreise liegen, also demselben Widerstande $(R_2 + R_a)$ angehören, so ist

$$\frac{T_2T}{BT} = \frac{S_2S}{BS}. \tag{2}$$

Die Division von 2) durch 1) gibt

$$\frac{CT}{BT} = \frac{S_2S}{S_1S} \cdot \frac{CS}{BS} \quad \text{oder} \quad \frac{S_1S}{S_2S} = \frac{BT}{CT} : \frac{BS}{CS}. \tag{3}$$

Setzt man $BT/CT = \operatorname{tang} \alpha$ und $BS/CS = \operatorname{tang} \beta$, so wird

$$S_1S : S_2S = \operatorname{tang} \alpha : \operatorname{tang} \beta = BT_0 : BS_0 = \lambda,$$

wenn S_0 und T_0 die Schnittpunkte von CS und CT mit der in B auf AC errichteten Senkrechten sind. Es bilden also die Gesamtwiderstände $(R_2 + R_a)$, weil sie bei konstanter Stromstärke I_2 den Abschnitten S_1S, S_2S ... proportional sind, eine geometrische Reihe, und es ist

$$\frac{R_2 + R_{a_1}}{R_2 + R_{a_2}} = \frac{R_2 + R_{a_2}}{R_2 + R_{a_3}} = \dots \lambda = \frac{BT_0}{BS_0}.$$

Da diese Widerstände proportional mit tang BCK sind, so kann man sie auch durch die Strecken HK_1, HK_2 ... darstellen. Macht man $CH : CN = \lambda$ und zieht man durch N eine Senkrechte zu BC, so ergibt die dargestellte Konstruktion direkt die Widerstände. Für die Konstruktion genügt die Festlegung der Punkte S und T, die einfache Konstruktion der Punkte S_0 und T_0 sowie der Punktreihe K wobei CK_1 senkrecht auf CT steht. Ist s die Schlüpfung ohne vorgeschalteten Widerstand in Prozent, R_{an} der ganze bei Stillstand und maximalem Strom vorhandene Widerstand des Anlassers, so ist

$$R_2 \lambda^n = R_2 + R_{a_n} \quad \text{oder} \quad R_{a_n} = R_2(\lambda^n - 1) \quad \text{und} \quad 1/\lambda^n = s.$$

Der bis jetzt betrachtete Widerstand ist nur so groß, daß beim Einschalten sofort die größte Stromstärke MT auftritt. Da dies im allgemeinen unzulässig ist, muß man den Anlasser noch durch eine Reihe gleich großer Stufen ergänzen, so daß beim Einschalten nur der dritte bis fünfte Teil des normalen Stromes auftritt.

(521) Bürstenabhebevorrichtung. Um die Abnutzung der Schleifringe und Bürsten zu verringern, werden die Motoren meistens mit einer Vorrichtung versehen, durch die die Schleifringe, nachdem der Anlaßwiderstand ganz abgeschaltet ist, kurz geschlossen und die Bürsten abgehoben werden. In Abb. 258 legt eine unterhalb der Schleifringe gelagerte, mit einem Handrade gedrehte Spindel mit Hilfe zweier Nocken nacheinander zwei Hebel um. Der eine von diesen schiebt die rechts auf einem Zapfen der Schleifringbuchse gelagerte und mit drei Kontaktfedern versehene Glocke nach links und schließt dadurch die Schleifringe kurz, der andere dreht darauf den Bürstenträger und hebt dadurch die Bürsten von den Ringen ab. Vielfach wird diese Vorrichtung mit dem Anlasser so zusammengebaut, daß das Abschalten der Widerstandsstufen, das Kurzschließen der Schleifringe und das Abheben der Bürsten durch einfaches Drehen an einem Handrade in richtiger Reihenfolge ausgeführt wird. Vgl. Abb. 309.



(522) Die Gegenschaltung (Görges, ETZ 1894, S. 644) besteht darin, daß beim Anlauf zwei in Stern geschaltete Abteilungen auf dem Sekundäranker entweder mit verschieden großen Windungszahlen in gleicher relativer Lage zueinander, Abb. 259, oder mit gleichen Windungszahlen bei einer Verdrehung um 60 elektrische Grade, Abb. 260, mit ihren gleichnamigen Anfängen zusammengeschaltet werden, während diese für Dauerbetrieb sämtlich untereinander kurz geschlossen werden. In Schaltung I wirkt die algebraische, in Schaltung II die geometrische Differenz der EMKe auf die Summe der Widerstände; der Kurzschluß zwischen *A*, *B*, *C* macht die Wicklungsabteilungen voneinander unabhängig. Die erste Wicklung eignet sich für Drahtwicklung und gestattet verschiedene Abstufungen, die zweite Wicklung für Stabwicklung mit zwei Stäben für 1 Nut. Geht bei derselben Schlüpfung durch Gegenschaltung die Stromwärme im Sekundärkreis auf den m-ten Teil zurück, so muß die Schlüpfung zur Herstellung des früheren Drehmomentes m-mal so groß werden, wobei die Stromwärme ebenfalls m-mal so groß wird wie bei Normalschaltung. Sind bei Drahtwicklung die Drähte für eine Nut 2 und 1, so wirkt bei Gegenschaltung die einfache EMK auf den Widerstand dreier Drähte, bei Normalschaltung die einfache EMK auf den Widerstand eines Drahtes, die doppelte EMK auf den Widerstand zweier Drähte. Demnach verhalten sich die

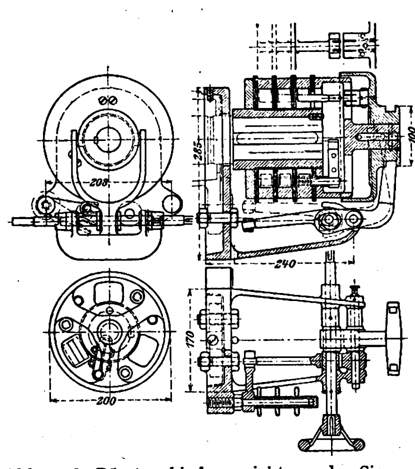


Abb. 258. Bürstenabhebevorrichtung der Siemens-Schuckertwerke, Maßstab 8 : 100.

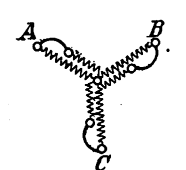


Abb. 259. Gegenschaltung; Wicklungen parallel.

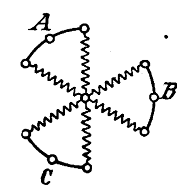


Abb. 260. Gegenschaltung; Wicklungen gegeneinander verdreht.

Stromwärmen wie $\frac{1^2}{3} : \left(\frac{1^2}{1} + \frac{2^2}{2}\right) = \frac{1}{9}$. Bei Gegenschaltung ist also die Schlüpfung die neunfache, sie wirkt daher so, als wenn der achtfache Ankerwiderstand vorgeschaltet wäre. Bei der zweiten Art wirkt die einfache EMK entweder auf jeden Draht oder auf zwei Drähte; die Schlüpfungen verhalten sich daher hier immer wie 1 : 4. Dies Verhältnis genügt in den meisten Fällen, um den Motor mit übernormalem Moment anlaufen zu lassen. Die Umschaltung erfolgt am besten durch einen selbsttätigen Kurzschließer, der auf der Welle festgekeilt ist und bei einer bestimmten Geschwindigkeit (etwa 80%) durch Zentrifugalkraft den Kurzschluß herstellt, vgl. (378) und Abb. 180.

(523) Anlassen mit Polumschaltung. Motoren, die mit Polumschaltung versehen sind, können in sehr rationeller Weise so angelassen werden, daß man zuerst

die größte Polzahl einstellt und so bei geringer Drehzahl des Drehfeldes anfährt und allmählich auf die höheren Drehzahlen durch Verringerung der Polzahlen übergeht. Dies Verfahren ist hauptsächlich von der Maschinenfabrik Oerlikon ausgebildet worden.

(524) Anlassen mit Kaskadenschaltung. Bei Kaskadenschaltung kann man ebenfalls in ziemlich rationeller Weise anfahren. Benützt man die Kaskadenschaltung, wie gewöhnlich, lediglich zum Anfahren, so kann der Hintermotor mit Käfiganker von verhältnismäßig hohem Widerstande ausgeführt und magnetisch hoch gesättigt werden. Man erreicht dann eine einfache Schaltung und sehr große Zugkraft auch noch dann, wenn die Netzspannung nicht ganz konstant gehalten wird (Eisenbahnbetrieb, z. B. Veltlinbahn, vgl. El. Bahnen u. Betr. 1904, S. 394 und 407; 1905, S. 25 und 454).

(525) Kompensierung des Blindstromes ist von Heyland vorgeschlagen worden unter Zuhilfenahme eines Kommutators, vgl. Aufsätze von Heyland, ETZ 1901 bis 1903, ferner von Kapp mit Hilfe schwingender, an die Schleifringe angeschlossener Gleichstromdynamos, vgl. ETZ 1912, S. 778; 1913, S. 931; 1916, S. 625; 1919, S. 405; ferner von Nehlsen mit Hilfe einer Drehstromkommutatormaschine (536), die an die Schleifringe des Sekundärankers angeschlossen und durch einen Motor angetrieben wird, vgl. ETZ 1917, S. 584., endlich von Heyland unter Zuhilfenahme von Phasenschiebern (541). Es kommt darauf an, dem Strome I_2 eine Voreilung vor der EMK E_2 zu geben, I_2 also in den linken oberen Quadranten, Abb. 246, zu bringen. Dazu ist eine EMK nötig, die am besten 90° voreilende Phasenverschiebung vor E_2 und dieselbe Frequenz wie E_2 hat.

Der Vorteil der Kompensation liegt einerseits in der Vergrößerung des Leistungsfaktors, anderseits in einer besseren Ausnutzung des Materials, so daß die Motoren bei gleichem Gewicht mehr leisten, endlich auch in der Möglichkeit, den Luftspalt größer zu wählen; der Nachteil in der Anordnung des Kommutators oder besonderer Maschinen, so daß sich die Kompensation nur bei großen Maschinen lohnt.

(526) Der Induktionsmotor als Generator[1]. Bewegt sich Punkt I, Abb. 247, auf der unteren Hälfte des Kreises, so sind D und s negativ. Der Motor muß also mechanisch angetrieben werden Liegt I unterhalb der Horizontalen durch M, so ist auch N_{el} negativ. Der Motor nimmt dann mechanische Leistung auf und gibt elektrische Leistung vom Primäranker aus ab, er läuft als Generator. Punkt C wird bei unendlich großer Schlüpfung in der einen oder anderen Richtung, d. h. bei unendlich großer Drehzahl in beliebiger Richtung erreicht.

Die Generatorwirkung des Induktionsmotors bei Übersynchronismus hat bei stark schwankenden Kraftbetrieben den Vorteil eines Belastungsausgleiches, da bei Belastungsschwankungen in der Regel die Drehzahl der Generatoren und dadurch die Frequenz vorübergehend verringert wird, so daß sämtliche in dem Augenblick laufenden Motoren momentan als Generatoren laufen. Hiervon ist insbesondere im Eisenbahnbetrieb Gebrauch gemacht worden (El. Bahn. u. Betr. 1905, S. 514 u. a. a. O.).

Generatorwirkung anderer Art kann eintreten, wenn ein Drehstrommotor in einem Netz mit stark unsymmetrisch verteilter Spannung läuft. In dem Falle gibt er von der aus dem einen Wicklungszweig aufgenommenen Leistung solche an den anderen ab, wirkt also ausgleichend. Hierbei können indessen einzelne Teile der Wicklung überlastet werden. Im äußersten Falle, wenn in einem Zweig die Netzspannung auf Null gesunken ist, kann der Motor diese Spannung wiederherstellen. Damit ergibt sich das Prinzip eines von Arno angegebenen Phasenumformers.

(527) Als **asynchronen Stromerzeuger** kann man den Induktionsmotor daher in Verbindung mit Synchrongeneratoren verwenden. Der Erregerstrom, der im wesentlichen Blindstrom ist, muß dabei von den parallelgeschälteten Synchron-

[1]) Feldmann, Asynchrone Generatoren für ein- und mehrphasige Wechselströme. Berlin, Springer 1903.



generatoren geliefert werden, und dadurch ist zugleich die Frequenz des von ihm erzeugten Stromes bestimmt. Es empfiehlt sich daher eine Kompensation nach (525) anzuwenden. Es ist sogar möglich, daß der Induktionsgenerator einen Synchronmotor speist und zugleich von ihm die Erregung erhält. Solche Generatoren verlangen wenig Wartung, sie sind aber ohne Kompensation des starken Blindstromes wegen nur bei langen Fernleitungen mit großer Kapazität zu empfehlen, wobei eine vorteilhafte Kompensation der voreilenden Blindströme der Leitung und der nacheilenden der Generatoren eintreten kann.

(528) Der Induktionsmotor für Einphasenstrom. Unterbricht man bei einem Drehstrominduktionsmotor, nachdem man ihn in Gang gesetzt hat, eine Zuleitung, so läuft er weiter und ist, wenn auch nicht in demselben Maße wie vorher, imstande, mechanische Leistung abzugeben. Er bildet dann einen einphasigen Induktionsmotor. Diese Anordnung ist in der Tat die übliche. Zwei in Reihe geschaltete Zweige einer Drehstromwicklung oder ein Zweig einer Zweiphasenwicklung bilden den Hauptstromkreis des Primärankers, in dem daher zunächst ein feststehendes magnetisches Wechselfeld erzeugt wird. Der Sekundäranker ist genau wie der der Mehrphasenmotoren ausgebildet und kann eine Kurzschlußwicklung, eine Wicklung mit Schleifringen, Gegenschaltung usw. besitzen. Der Einphasenmotor hat bei Stillstand kein Drehmoment, es entwickelt sich erst beim Laufen und zwar in der Drehrichtung; daher ist der Betrieb in beliebiger Richtung möglich, je nachdem man ihn in Gang gesetzt hat. Infolge der Drehung entsteht durch die Ströme im Sekundäranker ein Querfeld, d. h. ein Feld, das bei zweipoliger Anordnung senkrecht zu dem Felde der Primärwicklung steht. Beide Felder bilden zusammen, da sie nahezu um 90° gegeneinander in der Phase verschoben sind, ein Drehfeld. Damit sich das Querfeld genügend stark ausbilden kann, muß der Widerstand im Sekundäranker möglichst gering sein. Mit Vergrößerung des Widerstandes sinkt das Drehmoment schnell, eine Regulierung der Geschwindigkeit durch Einschalten von Widerständen in den Sekundäranker, wie bei Mehrphasenmotoren, ist daher unmöglich. Bei Übersynchronismus läuft der Motor als Generator. Die Stromwärmeleistung im Sekundäranker in Bruchteilen der auf ihn übertragenen Leistung ist bei normalem Betriebe etwa gleich der doppelten Schlüpfung und erreicht bei Synchronismus ihren geringsten Wert. Die Leistung beträgt etwa 60—70% von der eines gleich großen Drehstrommotors, der Wirkungsgrad ist einige Prozent geringer. Diagramm des Motors (543).

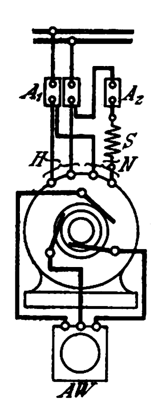


Abb. 261. Anlaßschaltung des einphasigen Induktionsmotors.

(529) Anlassen des einphasigen Induktionsmotors. Die üblichste Methode, den Einphasenmotor in Gang zu setzen, beruht darauf, daß schon bei Stillstand ein Drehfeld erzeugt wird. Dazu ist eine K u n s t p h a s e erforderlich. Man benutzt einen zweiten räumlich um $(90/p)°$ verschobenen Stromkreis, z. B. den dritten für den Betrieb weggelassenen Zweig des Drehstrommotors, in dem durch eine Drosselspule oder einen Flüssigkeitskondensator eine Phasenverschiebung gegen den Strom im Hauptkreis hergestellt wird (Abb. 261). Etwa bei doppelter Normalstromstärke im Primäranker kann man normales Anlauf-Drehmoment erzielen. Der Hilfskreis muß nach dem Anlassen unterbrochen werden. Außerdem ist noch eine der für Mehrphasenstrom nötigen Anlaßvorrichtungen (Widerstand im Sekundäranker, Gegenschaltung usw.) anzuwenden.

Arnold und Schüler (ETZ 1903, S. 565) versehen den Läufer mit Kommutatorwicklung und lassen ihn als Repulsionsmotor (547) anlaufen. Arnold verwandelt dann die Läuferwicklung durch Kurzschluß der Kommutatorteile miteinander in eine Kurzschlußwicklung. Schüler schließt geeignete Punkte der Ankerwicklung über Schleifringe und Bürsten an einen Drehstromanlasser an, der beim Betrieb kurzgeschlossen ist. Das resultierende Drehmoment ist dann beim Anlauf nahezu gleich der Summe der Drehmomente, die der Motor einzeln als Repulsionsmotor und als Induktionsmotor entwickelt. Die Ausnutzung der Läuferwicklung ist in diesem Falle ungünstig (447).

Kommutatormotoren für Wechselstrom[1]).

(530) Allgemeines. Kommutatormotoren werden für Mehrphasenstrom und Einphasenstrom gebaut. Der Kommutator hat die Eigenschaft, daß er die Frequenz der in der Wicklung zwischen den Bürsten induziertem EMK von der Drehzahl der Wicklung unabhängig macht.

Die Anwendung des Kommutators bei Wechselstrommotoren bringt folgende Vorteile: wirtschaftliche Regulierbarkeit der Geschwindigkeit in weiten Grenzen, Erzielung eines hohen Leistungsfaktors und eines großen Anlaufmomentes auch bei Einphasenstrom; sie macht die Motoren aber komplizierter, teuerer und reparaturbedürftiger, als es die Induktionsmotoren sind. Man kann allgemein Motoren mit Reihenschlußcharakteristik und solche mit Nebenschlußcharakteristik unterscheiden, vgl. (482). Die Motoren mit Reihenschlußcharakteristik gehen bei völliger Entlastung durch, sie zeichnen sich anderseits durch ein großes Anlaufmoment aus und werden daher besonders für Einphasen-

[1]) Literatur: Mehrphasenkommutatormotoren: Görges, ETZ 1891, S. 699. — Blondel, Ecl. él. Bd. 35, S. 121. — Winter, Zeitschr. f. El. u. Maschb. 1903, S. 213. — Rüdenberg, ETZ 1910, S. 1181, ETZ 1911, S. 233, El. u. Maschb. 1911, S. 467. — Jonas, ETZ 1910, S. 390. — Eichberg, ETZ 1910, S. 749. — Schenkel, ETZ 1912, S. 473. — Binder, ETZ 1913, S. 410. — Heyland, ETZ 1914, S. 85. — v. Kleist, ETZ 1914, S. 1005. — Osnos, ETZ 1918, S. 215.

Kaskadenschaltungen von Drehstrom-Induktionsmotoren mit Kommutatormotoren: Fleischmann, ETZ 1910, S. 191. — Rajz, Arbeiten aus d. Elektrotechn. Inst. Karlsruhe, Bd. 2. — Rüdenberg, El. K. u. B. 1914, S. 425. — Scherbius, ETZ 1912, S. 1079; 195, S. 299

Einphasen-Kommutatormotoren: Klassifizierungen: Atkinson, Proc. of the Inst. of Civil Eng. London, 1898, S. 113. — Osnos, ETZ 1904, S. 1. — Pichelmayer, ETZ 1904, S. 464. — Sumec, El. u. Maschb. 1904, S. 173. — Fyn, The Electrician, London, 1906, Bd. 57, S. 204. — Görges, ETZ 1907, S. 730. — Jonas, ETZ 1908, S. 183. — Aufsätze: Eichberg, ETZ 1904, S. 75 (Latour-Winter-Eichberg-M.). — Richter, ETZ 1906, S. 537, 1907, S. 827 (Reihenschlußmotor). — Schnetzler, ETZ 1905, S. 72; 1907, S. 818 u. 1097; 1909, S. 320 (Thomson-Déri-Motor). — Osnos, ETZ 1907, S. 336, 1908, S. 2 (Doppelschlußmotor). Weitere Aufsätze in d. ETZ u. andern Zeitschr. von Alexanderson, Arnold, Behn-Eschenburg, Bragstad, Breslauer, van Cauwenberghe, Danielson, Eichberg, Fleischmann, Fyn, Latour, Niethammer, Osnos, Punga, Richter, Rusch, Schnetzler, Sumec.

Berechnung d. Motoren siehe: Fischer-Hinnen, ETZ 1909, S. 485. — Ossanna, ETZ 1911, S. 581. — Simons u. Rogowski, ETZ 1908, S. 535 (Streuung). — Schenkel, El. u. M. 1911, S. 1019 (Streuung). — Schenkel, ETZ 1917, S. 101.

Monographien: Heubach, D. Wechselstromserienmotor-Voitsche Samml. 1899. — Niethammer, D. Wechselstrom- Kommutatormotoren, Zürich 1905. — Stern, Untersuch. d. Felder eines Einphasenrepulsionsmotors, System Déri, Diss. Karlsruhe 1910. — Wolf, Experimentelle Bestätigung d. Vektordiagrammes für d. Motor nach Winter-Eichberg-Latour, Diss. Dresden 1910. — Meyer-Delis, Beitrag zur Theorie des Mehrphasen-Wechselstrom-Compoundmotors. Diss. Hannover 1908. — Alexander, Drehstrommotoren mit Kommutator für regelbare Drehzahl. Diss. Berlin 1908. — Dyhr, Die Einphasen-Motoren hach den deutschen Patentschriften, Diss. Dresden und Berlin 1912, Springer. — Hillebrand, D. Theorie d. Drekstrom-Kollektor-Nebenschluß-Motors mit gehemmter Erreger- u. Kompens.-Wicklung. Diss. Müncken 1912. — Jaensch, Beiträge z. vektordiagrammat. Darstellg. d. Arbeitsweise d. allgem. Transform. mit Eisen u. des Repulsionsmotors nach Thomson. Diss. Dresden 1914. — Seiz, D. asynchrome Eisenkernformer (Frequenzumformer). Diss. Karlsruhe 1914. — Schmitz, D. Winter-Eichberg-Latour-Kollektor-Motor als selbsterregter Generator. Diss. Dresden 1916.

strom im Bahnbetrieb verwendet. Die Motoren mit Nebenschlußcharakteristik besitzen ein verschwindend geringes Anlaufmoment und müssen daher durch besondere Schaltungen angelassen werden. Zum Anlassen und zum Regulieren der Geschwindigkeit werden nicht Widerstände, sondern Reguliertransformatoren — meist einspulige in Sparschaltung (337) — verwendet, wodurch eine größere Wirtschaftlichkeit erzielt wird. Von Kompensationswicklungen und Wendepolen (384, 385) wird in umfangreichster Weise Gebrauch gemacht, häufig wird beides zugleich angewendet.

(531) Direkte und durch Transformatoren vermittelte Schaltungen. Die Transformatoren sind so zu schalten, daß der Charakter der Reihenschlußschaltung oder der Nebenschlußschaltung dadurch nicht verloren geht. Dies mögen die Abb. 262 bis 267 verdeutlichen. Bei der Reihenschlußschaltung liegt die

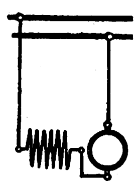
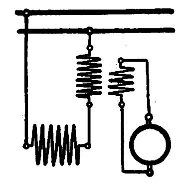
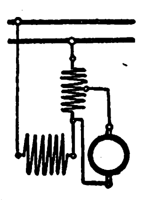




Abb. 262 bis 264. Reihenschlußschaltung für Kommutatormotoren.
Abb. 262. Direkte. Abb. 263. Mit zweispuligem Abb. 264. Mit einspuligem Transformator.

Primärspule des Transformators in Reihe mit der Ständerwicklung, während die Sekundärspule an die Bürsten der Läuferwicklung angeschlossen ist. Abb. 263 stellt die Anordnung bei einem zweispuligen, Abb. 264 die bei einem einspuligen Transformator dar. Man erhält die letzte Schaltung, indem man sich die beiden Spulen des Transformators in Abb. 263 übereinandergeschoben und zu einer einzigen vereinigt denkt. Bei Abb. 262 haben Läufer und Ständer denselben Strom, bei Abb. 263 und 264 erhält der Läufer einen Strom, dessen Stärke der Stromstärke

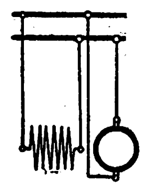
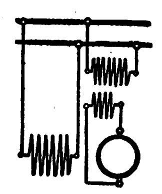
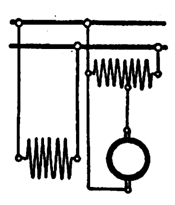




Abb. 265 bis 267. Nebenschlußschaltung für Kommutatormotoren.
Abb. 265. Direkte. Abb. 266. Mit zweispuligem Abb. 267. Mit einspuligem Transformator.

im Ständer proportional ist. Ist der dem Läufer zugeführte Strom schwächer als der Ständerstrom, so kann man sich statt dessen denken, der Strom wäre in beiden Teilen gleich stark, die Windungszahl auf dem Läufer aber verringert. Eine Vermehrung der sekundären Windungen des Transformators verringert die sekundäre Stromstärke, wirkt also ebenso, als wenn bei direkter Schaltung die Windungen der Läuferwickelung vermindert worden wären.

Bei der Nebenschlußschaltung liegt die Primärwicklung des Transformators am Netz, also parallel zur Ständerwicklung, während die Sekundärwicklung genau wie vorher an die Bürsten der Läuferwicklung angeschlossen ist. Abb. 266 stellt die Anordnung wieder bei einem zweispuligen, Abb. 267 bei

einem einspuligen Transformator dar. Bei Abb. 265 erhält der Anker die volle Netzspannung, bei Abb. 266 und 267 einen ihr proportionalen Teil. Eine Vermehrung der sekundären Windungszahl des Transformators erhöht die Spannung an der Läuferwicklung, wirkt also ebenso, als wenn bei direkter Schaltung die Windungen der Läuferwicklung vermindert worden wären.

(532) Zerlegung der Wicklungen in X- und Y-Wicklungen. Wir denken uns ein beliebig gerichtetes Feld in einem zweipoligen Motor in zwei aufeinander senkrecht stehende Komponenten, eine horizontale X-Komponente und eine vertikale Y-Komponente, zerlegt und denken uns diese Komponenten durch besondere Wicklungen, eine X-Wicklung und eine Y-Wicklung, erzeugt. Bei mehrpoligen Motoren schließen diese Wicklungen $(90/p)^\circ$ miteinander ein. Diese Zerlegung ist immer möglich, und ihr Zusammenwirken gibt immer das richtige resultierende Feld, wenn die Felder im Luftspalt sinusartig verteilt sind; andernfalls ist sie nur angenähert richtig. Die Ströme in diesen Wicklungen, bei Kommutatorwicklungen die durch je ein Bürstenpaar zugeführten, seien I_x und I_y. Bei einem vollkommenen Drehfelde haben die Ströme I_x und I_y 90° Phasenverschiebung gegeneinander und sind dabei gleich stark. Haben die Ströme keine Phasenverschiebung gegeneinander, so erzeugen sie ein Wechselfeld in einer festen Richtung, dessen Achse mit der X-Achse den Winkel ω einschließen möge. Dann ist

$$\operatorname{tang} \omega = \frac{m_y I_y}{m_x I_x},$$

wenn m_x und m_y die Windungszahlen der beiden Wicklungen sind.

Die Achse einer Kommutatorwicklung ist immer durch die Bürstenstellung bestimmt. Wir nehmen an, die Verbindungen der Wicklung mit dem Kommutator seien derart, daß die Verbindungslinie der Bürsten die Richtung der Achse anzeigt. Hat man zwei Bürstenpaare, die um $(90/p)^\circ$ gegeneinander verdreht sind, so kann man durch jedes Bürstenpaar einen Strom schicken, ohne daß diese in den äußeren Teilen der Stromkreise einander stören. In den Teilen der Kommutatorwicklung kann man sich die Ströme superponiert denken. Die magnetische Wirkung ist so, als wenn jeder Strom in einer besonderen Wicklung flösse.

(533) EMKe in der Kommutatorwicklung. In der Kommutatorwicklung entstehen zwischen den Bürsten EMKKe, deren Frequenz bei jeder beliebigen Geschwindigkeit genau mit der Frequenz des magnetischen Feldes, in dem der Anker läuft, übereinstimmt. Man kann daher bei jeder Drehzahl Wechselstrom von dieser Frequenz durch den Anker schicken. Hierin beruht gerade die Bedeutung des Kommutators. Die EMKe sind zweierlei Art:

1. EMK der Ruhe, hervorgerufen durch die Änderung des die ruhend gedachte Wicklung in der Richtung ihrer Achse durchsetzenden Induktionsflusses — Bezeichnung E'. Sie hat 90° nacheilende Phasenverschiebung gegen den Induktionsfluß und ist ein leistungslose oder Blindkomponente der EMK. Ihre Richtung ist unabhängig von der Drehungsrichtung des Ankers, ihre Größe ist von der Verteilung des Magnetismus längs des Umfanges des Ankers abhängig.

2. EMK der Drehung, hervorgerufen durch die Drehung des Ankers in dem konstant gedachten Induktionsfluß, der die Wicklung senkrecht zu ihrer Achse trifft — Bezeichnung E''. Sie hat 0° oder 180°. Phasenverschiebung gegen den Induktionsfluß und ist eine Leistungskomponente der EMK. Ihre Richtung kehrt sich zugleich mit der Drehungsrichtung des Ankers um, ihre Größe hängt nur vom Gesamtfluß, nicht von seiner Verteilung längs des Umfanges des Ankers ab. Bei mehrpoligen Maschinen ist der Induktionsfluß um $(90/p)^\circ$ gegen die Achse der Wicklung verdreht.

Bei positiver Rotation des Ankers, Abb. 268a und b, sind die EMKe, bezogen auf ein Polpaar, wenn der Induktionsfluß längs des Umfanges nach einem Sinusgesetz verteilt ist,

in der X-Wicklung

$$E_{x_2}' = \sqrt{2} \cdot f m_{x_2} \Phi_{0 x_2} 10^{-8} \text{ Volt mit } 90^\circ \text{ nacheilender Phasenverschiebung}$$

$$E_{x_2}'' = v\sqrt{2} \cdot f m_{x_2} \Phi_{0 y_2} 10^{-8} \text{ Volt mit } 180^\circ \text{ Phasenverschiebung}$$

in der Y-Wicklung

$$E_{y_2}' = \sqrt{2} \cdot f m_{y_2} \Phi_{0 y_2} 10^{-8} \text{ Volt mit } 90^\circ \text{ nacheilender Phasenverschiebung}$$

$$E_{y_2}'' = v\sqrt{2} \cdot f m_{y_2} \Phi_{0 x_2} 10^{-8} \text{ Volt mit } 0^\circ \text{ Phasenverschiebung.}$$

Bei negativer Drehungsrichtung des Ankers, Abb. 269a und b, bleiben E_x' und E_y' unverändert, E_x'' und E_y'' kehren ihre Vorzeichen um.

Index 1 bezieht sich immer auf den Ständer, Index 2 auf den Läufer. m_{x_2} und m_{y_2} sind die Windungszahlen der X_2- und Y_2-Wicklung, bezogen auf ein Polpaar ($2m = z$), f ist die Frequenz der Induktionsflüsse Φ_{0x_2} und Φ_{0y_2}, unter diesen immer die Amplituden verstanden, v das Verhältnis der wahren zur synchronen Geschwindigkeit. $v = 1$ entspricht also dem Synchronismus.

Wenn die magnetischen Felder im Luftspalt nicht sinusförmig verteilt sind, treten statt der Koeffizienten $\sqrt{2}$ andere von mitunter erheblich davon abweichenden Werten auf.

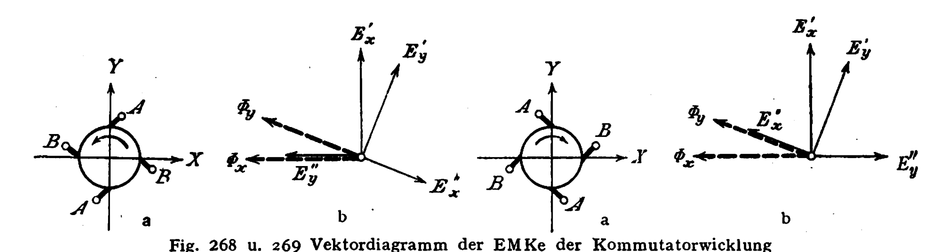


Fig. 268 u. 269 Vektordiagramm der EMKe der Kommutatorwicklung bei positiver Drehungsrichtung. bei negativer Drehungsrichtung.
Die Diagramme beziehen sich immer nur auf den zeitlichen Verlauf der periodisch veränderlichen Größen und haben mit ihren Richtungen im Raume nichts zu tun.

Da die Richtungen von Φ_x und Φ_y fest liegen, können in ruhenden Wicklungen immer nur EMKKe der Ruhe E' auftreten. Der Kurzschluß einer solchen Wicklung bedeutet praktisch immer, daß der zugehörige Induktionsfluß verschwindend gering ist, weil sonst so starke Ströme entstehen würden, daß die Wicklung Schaden litte. Dagegen kann durch eine umlaufende Wicklung auch bei Kurzschluß ein starker Induktionsfluß hindurchgehen, weil die beiden von verschiedenen einander kreuzenden Induktionsflüssen herrührenden EMKKe E' und E'' eine Resultierende von ganz geringer Größe ergeben können, wie z. B. im Kurzschlußläufer der Induktionsmotoren.

(534) Drehmomente. Die Y_2-Wicklung erleidet im X_2-Felde ein Drehmoment D_1, die X_2-Wicklung im Y_2-Felde ein Drehmoment D_2. Die Drehmomente sind periodische Funktionen der Zeit mit doppelt so großer Frequenz wie die des magnetischen Feldes. Der Mittelwert der Drehmomente ist dem Ausdruck $\Phi_2 I_2 \cos(\Phi_2 I_2)$ proportional und daher am größten, wenn keine Phasenverschiebung zwischen Φ_2 und I_2 vorhanden ist, und gleich Null, wenn sie 90° beträgt. Der Mittelwert von Drehmomenten, die von Φ und I von verschiedenen Frequenzen herrühren, z. B. von Oberschwingungen verschiedener Frequenzen, ist gleich Null. Bei sinusartiger Verteilung des magnetischen Feldes im Luftspalt erhält man

$$D_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2\pi} 10^{-1} p^2 m_{y_2} I_{y_2} \Phi_{0x_2} \cos(\Phi_{0x_2}, I_{y_2}) \text{ cmdyn},$$

$$D_2 = +\frac{\sqrt{2}}{2\pi} 10^{-1} p^2 m_{x_2} I_{x_2} \Phi_{0y_2} \cos(\Phi_{0y_2}, I_{x_2}) \text{ cmdyn}.$$

Hierin ist p die Polpaarzahl, I_{x_2} und I_{y_2} bedeuten effektive Mittelwerte der Ströme je eines Bürstenpaares in A, Φ_{0x_2} und Φ_{0y_2} Amplituden, wie üblich in CGS-Einheiten. Um die Drehmomente in kg*m zu erhalten, muß man diese Werte mit $9{,}81 \cdot 10^7$ dividieren.

Das Drehmoment des Gleichstrommotors ist (409)

$$D_{gl} = +\frac{1}{\pi} 10^{-1} p^2 m_{y_2} I_{y_2} \Phi_{x_2} \text{ cmdyn}.$$

Bei den Mehrphasenmotoren ist das resultierende Drehmoment meistens gleich $\sqrt{D_1^2 + D_2^2}$ und daher bei gleichem Maximum von Φ ebenso groß wie bei Gleichstrom. Bei den Einphasenmotoren tritt aber nur eines der Drehmomente auf, sie sind daher gegenüber den Gleichstrommotoren im Nachteil. Das Verhältnis ist dann nämlich $(\sqrt{2}/2\pi) : (1/\pi) = 0{,}707$, eine Zahl, die durch geschickte Anordnung noch erhöht, aber nicht bis auf 1 gebracht werden kann.

(535) Arbeits- und Erregerwicklungen. (Atkinson Proceed. Inst. Civil Eng. London 1898, S. 113. — Eichberg, ETZ 1904, S. 75.) Zwischen zwei gleichachsigen Wicklungen kann bei völliger Symmetrie kein Drehmoment auftreten, solche Wicklungen bilden vielmehr, auch wenn sie an dasselbe Netz angeschlossen sind, zusammen einen Transformator. Es wird also Leistung von der einen Wicklung aufgenommen (bei Anschluß an dasselbe Netz von der Wicklung mit der geringeren Windungszahl) und Leistung von der anderen abgegeben (von der Wicklung mit der größeren Windungszahl). Ist aber eine der Wicklungen beweglich, so kann man sie durch eine dritte Wicklung, die rechtwinklig mit ihr gekreuzt ist, zum Laufen bringen. Die ersten beiden Wicklungen sind Arbeitswicklungen, die dritte ist die Erregerwicklung. Die Felder der Arbeitswicklungen sind gegeneinander gerichtet und heben einander wie im Transformator bis auf einen geringen Rest auf, der für die Magnetisierung hinreicht. Sie bestehen z. B. aus der Kommutatorwicklung auf dem Läufer und der Kompensationswicklung auf dem Ständer, sie können aber auch indirekt durch Transformatoren parallel ans Netz angeschlossen sein, oder es kann eine von ihnen kurzgeschlossen sein. Die Phasenverschiebung der Ströme in ihnen gegen die zugehörigen Spannungen ist bei Belastung gering und kann völlig verschwinden. Die Erregerwicklung dagegen verhält sich wie eine Drosselspule, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung in ihrem Stromkreis ist daher sehr bedeutend. Damit ein möglichst großes Drehmoment entsteht, muß das Feld der Erregerspule gleiche Phase mit dem Strom in der umlaufenden Arbeitswicklung haben. Arbeitsspannung und Erregerspannung müssen daher im allgemeinen Phasenverschiebungen gegeneinander besitzen, deren Größe von der Geschwindigkeit und der Belastung des Motors abhängt. Während die Sekundärwicklung eines Transformators elektrische Leistung an einen äußeren Kreis abgibt, besteht hier die von der sekundären Arbeitswicklung abgegebene Leistung teils in elektrischer Form und kann ans Netz zurückgeliefert werden, teils in mechanischer Form. Der letzte Teil ist der Geschwindigkeit proportional, weil durch die Rotation in dem Felde der Erregerspule eine EMK der Bewegung entsteht, die der Geschwindigkeit proportional ist. Sorgt man dafür, daß der übrig bleibende Teil der bei Stillstand auftretenden EMK, der nun als Spannung an den Bürsten auftritt, auf das Netz zurückarbeitet, indem die Bürsten über einen Transformator mit dem Netz verbunden werden, so kann man je nach der an die Bürsten angelegten Spannung den Motor ohne besondere Verluste mit

jeder beliebigen Geschwindigkeit laufen lassen. Dieser Gedankengang läßt sich auf Mehrphasenstrom übertragen, indem man das System der drei Wicklungen um 90° verdreht noch einmal anordnet. Es können dann auch die Erregerwicklungen, deren Achse ja mit der der Arbeitswicklungen des anderen Systems zusammenfällt, gespart werden. Die Arbeitswicklungen führen dann auch die Erregerströme. Von den Arbeitswicklungen muß die eine immer auf dem Ständer, die andere auf dem Läufer liegen, die Erregerwicklung kann sich entweder auf dem Ständer oder auf dem Läufer befinden.

(536) Kommutatormotoren für Drehstrom. Abb. 270 zeigt die Reihenschlußschaltung, Abb. 271 die Nebenschlußschaltung unter Vermittelung von Transformatoren in Sparschaltung. Letztere ist von Winter und Eichberg (Z. f. El. u. Maschb. 1903, S. 213) zum Zwecke der Geschwindigkeitsregulierung vorgeschlagen worden. Man kann auch eine Doppelschlußschaltung anwenden. Der Reihenschlußmotor wird durch Bürstenverschiebung in Gang gesetzt und reguliert. Es gibt zwei ausgezeichnete Bürstenstellungen. In der einen fallen die Achsen

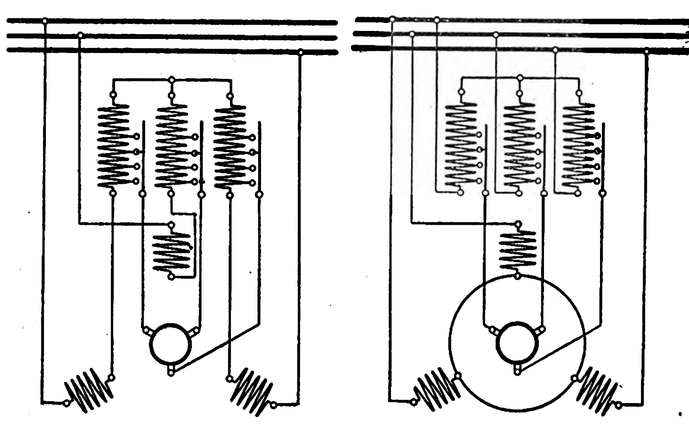


Abb. 270. Reihenschlußschaltung mit Transformator.

Abb. 271. Nebenschlußschaltung mit Transformator.

Drehstromkommutatormotoren.

der im gleichen Sinne umlaufenden magnetischen Felder in dieselbe Richtung — Leerstellung, der Motor verhält sich wie eine Drosselspule —, in der anderen sind sie einander genau entgegengesetzt gerichtet — Kurzschlußstellung, die magnetischen Felder heben sich bis auf ihre Differenz auf. In beiden Stellungen entwickelt sich kein Drehmoment. Verschiebt man die Bürsten aus der Leerstellung in einer beliebigen Richtung, so läuft der Motor in der entgegengesetzten Richtung an. Er kann also mit oder auch gegen sein Drehfeld laufen, im letzteren Falle allerdings unter ungünstigen Verhältnissen (geringer $\cos\varphi$). Der Motor ist für Förderanlagen mittlerer Größe verwendet worden, neuerdings hat er für den Antrieb von Spinnereimaschinen große Bedeutung gewonnen. Er kann auch zur Kompensation des Blindstromes von Induktionsmotoren verwendet werden, vgl. (525). Bei direkter Schaltung fließt in der Läuferwicklung, da sie in Dreieck geschaltet ist, nur das $1/\sqrt{3}$-fache des Stromes der Ständerwicklung. Da ferner die Ströme in den beiden Lagen der Ankerwicklung überall 60° Phasenverschiebung haben, ist der Strombelag nur das $\frac{1}{2}\sqrt{3}$-fache des Strombelages, den er bei

gleicher Phase der Ströme haben würde. Mithin muß der Läufer bei gleicher Durchflutung wie sie der Ständer hat, eine doppelt so große Zahl Windungen wie dieser besitzen. Abb. 315.

(537) **Diagramm des Drehstrom-Reihenschlußmotors.** Abb. 272 u. 273. Wir denken uns die Wicklungen durch Zweiphasenwicklungen ersetzt. Auf dem Ständer befinde sich eine X_1- und eine Y_1-Wicklung, auf dem Läufer drehbare A- und B-Wicklungen. Die X_1- und die A-Wicklung seien in Reihe geschaltet, die in ihnen induzierten EMKe seien E_{x_1} und E_a. In der Leerstellung fallen beide in dieselbe Richtung OAB. Verdrehen wir die Bürsten bei zweipoliger Anordnung aus dieser Stellung um den Winkel α (allgemein um $\alpha°/p$) im negativen Sinne, so daß der Motor ebenso wie das Feld im positiven Sinne umläuft, so schwenkt der E_a-Vektor um den Winkel α im positiven Sinne herum in die Lage AC und die resultierende EMK ist gleich OC. Beginnt nun der Motor zu laufen, so wird E_a kleiner, verschwindet bei Synchronismus und wird bei Übersynchronismus negativ. Der Endpunkt D der resultierenden EMK E wandert also auf einer Geraden von C nach A, fällt bei Synchronismus mit A zusammen und bei Übersynchronismus in die Verlängerung von CA über A hinaus. Ist α ein spitzer oder

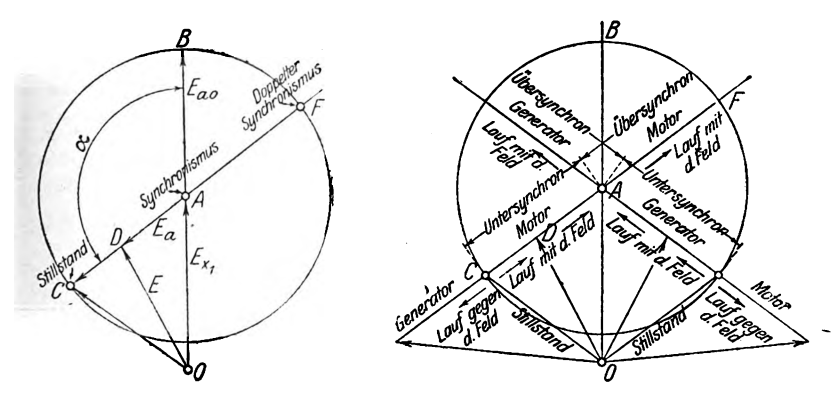


Abb. 272 und 273. Diagramm des Drehstromreihenschlußmotors.

auch ein rechter Winkel, so wird dabei OD zunächst kleiner, bei konstanter Spannung also der Strom und damit das Drehmoment größer. Der Motor ist daher bis zu einer gewissen Geschwindigkeit instabil, d. h. wenn er einmal in Bewegung gekommen ist, wächst das Drehmoment mit der Geschwindigkeit. Ist $\alpha = 90°$, so wird der kleinste Wert der EMK bei Synchronisms erreicht. Um ein großes Drehmoment zu erzielen, muß man α stumpf und zwar nahezu gleich 180° wählen. Auch dann kann der Motor bei geringen Geschwindigkeiten instabil sein, wenn E_a groß im Vergleich mit E_{x_1} ist. Schenkel (Siemens-Schuckertwerke) benutzt daher Doppelbürsten, von denen der eine Satz fest steht, der andere verstellbar ist. In der Leerstellung haben die zusammengehörigen Bürsten beider Sätze dieselbe Stellung. Man hat daher bei kleinen Winkeln α auch nur wenige Windungen in der A-Wicklung und der Motor wird dadurch bei allen Bürstenstellungen stabil. Hält man die Klemmenspannung konstant, so bleibt annähernd $E = OD$ konstant und Punkt A bewegt sich dann auf einem Kreise, der durch die Punkte O und D geht (Rüdenberg, ETZ 1910, S. 1181). Bei großer Geschwindigkeit kann der Motor $\cos\varphi = 1$ erreichen (Görges, ETZ 1891, S. 699). Wenn der Motor gegen das Drehfeld

läuft, ist er immer stabil, $\cos\varphi$ ist dann aber sehr gering. Der Motor kann auch als Generator laufen, auch dann muß α ein stumpfer Winkel sein. Abb. 273 gibt näheren Aufschluß über das Verhalten des Motors. Der Motor hat ausgesprochenen Reihenschlußcharakter. Das Drehmoment hängt nur von der Stromstärke und der Bürstenverstellung ab, durch die die Geschwindigkeit reguliert wird. Die Geschwindigkeit nimmt mit wachsender Belastung ab.

Der Drehstrom-Kommutatormotor in Nebenschlußschaltung ist nichts anderes als der Doppelkurzschlußmotor mit Reguliertransformator, vgl. (539).

(538) Der allgemeine Induktionsmotor. Wir nehmen an, die X-Bürsten und die Y-Bürsten seien kurz geschlossen, Φ_{x_2} und Φ_{y_2} hätten beliebige Größen und die beliebige Phasenverschiebung α gegeneinander, Abb. 274. E_{x_2}' und E_{y_2}' stehen um 90° nacheilend verschoben senkrecht auf Φ_{x_2} und Φ_{y_2}. Bei Stillstand denke man sich induktionsfreie Anlaßwiderstände in die Läuferwicklungen geschaltet. Die Läuferströme I_{x_2} und I_{y_2} haben dann dieselben Phasen wie E_{x_2}' und E_{y_2}'. Die Drehmomente $(\Phi_{x_2} I_{y_2})$ und $(\Phi_{y_2} I_{x_2})$ sind nach (534) beide positiv, wenn Winkel $(\Phi_{x_2} I_{y_2})$ ein stumpfer, Winkel $(\Phi_{y_2} I_{x_2})$ ein spitzer ist. Der Motor

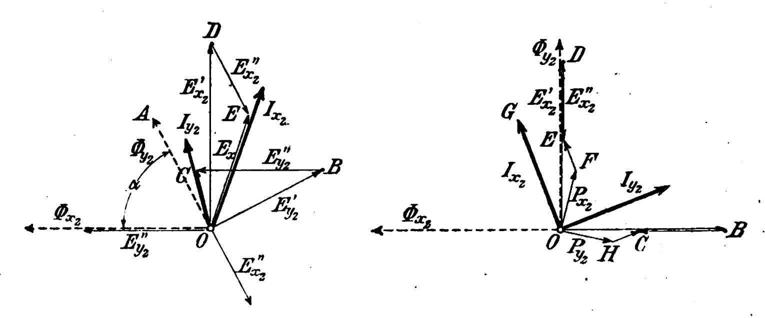


Abb. 274. Vektordiagramm des allgemeinen Induktionsmotors.

Abb. 275. Vektordiagramm des Mehrphasenmotors mit Reguliertransformators.

läuft dann im positiven Sinne an. Man kann daher jetzt E_{x_2}'' und E_{y_2}'' nach (533) und die resultierenden EMKE $E_{x_2} = [E_{x_2}' + E_{x_2}'']$ und $E_{y_2} = E_{y_2}' \mp E_{y_2}''$ zeichnen. Unter Zugrundelegung dieses Diagrammes findet man nun, wenn man

$$E_{x_2}' = \varepsilon \cdot f m_2 \Phi_{x_2}, \qquad E_{x_2}'' = v\varepsilon \cdot f m_2 \Phi_{y_2}$$
$$E_{y_2}' = \varepsilon \cdot f m_2 \Phi_{y_2}, \qquad E_{y_2}'' = v\varepsilon \cdot f m_2 \Phi_{x_2}$$

setzt, worin ε eine Konstante, R_2 den Widerstand einer Läuferwicklung bedeutet,

$$D = \frac{\varepsilon^2}{2\pi} \frac{m_2^2}{R_2} f[2\Phi_{x_2}\Phi_{y_2}\sin\alpha - (\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2)v],$$

$$N_{mech} = \varepsilon^2 \frac{m_2^2}{R_2} f^2[2\Phi_{x_2}\Phi_{y_2}\sin\alpha - (\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2)v]v,$$

$$W_2 = \varepsilon^2 \frac{m_2^2}{R_2} f^2[(\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2)(1+v^2) - 4v\Phi_{x_2}\Phi_{y_2}\sin\alpha],$$

$$N_2 = \varepsilon^2 \frac{m_2^2}{R_2} f^2[(\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2) - 2v\Phi_{x_2}\Phi_{y_2}\sin\alpha].$$

Unter W_2 ist die Stromwärmeleistung im Läufer zu verstehen, $N_2 = W_2 + N_{mech}$ ist die auf den Läufer übertragene Leistung. Der Ausdruck für D ist für Motorzähler wichtig. $(\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2)v$ ist das Fehlerglied. Um es klein zu halten, muß v sehr klein gewählt werden.

Für Mehrphasenstrom ist $\Phi_{x_2} = \Phi_{y_2} = \Phi_2$ und $\alpha = 90^\circ$, also $\sin \alpha = 1$. Man erhält hiermit die (502) abgeleiteten Gleichungen wieder.

(539) Der Doppelkurzschlußmotor mit Reguliertransformator. Schließt man die Bürsten nicht kurz, sondern legt man nach Winter und Eichberg (vgl. Winter, El. und Maschb. 1903, S. 213) die gleichen Spannungen P_{x_2} und P_{y_2} die um 90° gegeneinander verschoben sind und dieselbe Frequenz wie der Primärstrom haben, an die Bürsten, so erhält man die mittelbare Nebenschlußschaltung. Abb. 275 zeigt das Diagramm im X_2-Kreise. $E_{x_2}' = OD$ wird von Φ_{x_2} durch ruhende Induktion, $E_{x_2}'' = DE$ von Φ_{y_2} durch Rotation erzeugt und ist daher proportional mit v.

Soll der Motor dauernd mit dieser Geschwindigkeit laufen und dabei I_{x_2} die durch OG gegebene Größe und Phase haben, so muß zwischen den X-Bürsten die Spannung $P_{x_2} = OF$ liegen, wenn FE der Ohmsche Spannungsverlust ist. Die entsprechenden Vektoren des Y_2-Kreises sind um 90° nach rechts gedreht. Durch die Lage von OF kann man I_{x_2} beliebig eine Voreilung oder Nacheilung gegenüber OE geben. Eine Drehung von P_{x_2} nach rechts läßt I_{x_2} voreilen und umgekehrt. Durch eine Voreilung von I_{x_2} kann man erreichen, daß der Leistungsfaktor im Primärkreise zu Eins wird. Dazu braucht man nur die Bürsten zu verschieben. Kehrt man P_{x_2} und P_{y_2} um, so daß F unterhalb O, H links von O liegt, so wird E_{x_2}'' größer als E_{x_2}' und E_{y_2}'' größer als E_{y_2}', der Motor läuft also übersynchron; macht man $P_{x_2} = P_{y_2} = 0$, so läuft er in der Nähe des Synchronismus; bei $P_{x_2} = E_{x_2}'$ und $P_{y_2} = E_{y_2}'$ steht er still; wenn $P_{x_2} > E_{x_2}'$ und $P_{y_2} > E_{y_2}'$, so läuft er rückwärts. Statt der Zweiphasen- kann man ebensogut die Drehstromanordnung wählen, Abb. 271.

(540) Regulierung großer Induktionsmotoren. Um große Induktionsmotoren (von z. B. 1000 kW) nicht mit Kommutator ausführen zu müssen, wenn man sie dauernd mit Schlüpfungen von 10—30% laufen lassen will, kann man nach Scherbius (Brown, Boveri & Cie.) mit dem aus dem Läuferkreise genommenen Drehstrom, der eine der Schlüpfung proportionale Frequenz besitzt, einen Motor wie eben beschrieben treiben, indem man den Ständer direkt an die Schleifringe des ersten Motors, den Läufer über einen Reguliertransformator an sie anschließt. Man kann nun dem zweiten Motor eine solche Geschwindigkeit geben, daß eine dritte mit ihm direkt gekuppelte asynchrone oder synchrone Drehstrommaschine als Generator auf das Primärnetz zurückarbeiten kann. Man spart dadurch den größten Teil der Leistung, die bei einem durch Widerstände regulierten Induktionsmotor in den Widerständen verloren geht, wodurch sich die zusätzliche Anlage bald bezahlt macht. Wird der Generator vom Netz abgekuppelt, so geht der Kommutatormotor durch; hiergegen müssen Vorkehrungen vorgesehen werden. Weitere solche Schaltungen siehe Meyer, Die Verwendung verlustlos regelbarer Drehstrommotoren, El. K. u. B. 1911, S. 421. — Nehlsen, ETZ 1917, S. 584.

(541) Der Phasenschieber dient zur Kompensation der Phasenverschiebung großer langsam laufender Induktionsmotoren und besteht im einfachsten Falle nur aus einem umlaufenden Kommutatoranker, dem durch Bürsten Mehrphasenstrom zugeführt wird. Der Anker ist meistens von einem Ständer ohne Wicklung umgeben. Dieser pflegt an den Kommutierungsstellen Aussparungen mit oder ohne Wendepole zu besitzen und muß dann mittels Schnecke und Schneckenrad verdrehbar sein, wenn die Bürsten verstellbar sein sollen. Der äußere Ring kann auch ohne Luftschlitz mit dem Läufer verbunden sein und muß dann mit umlaufen. Durch die Frequenz des dem Kommutator zugeführten Mehrphasenstromes entsteht ein Drehfeld, dessen Umlaufgeschwindigkeit im Raume durch die Frequenz des Stromes festgelegt ist, unabhängig von der Umlaufgeschwindigkeit des Läufers. Wird der Phasenschieber an die Schleifringe eines Induktionsmotors angeschlossen, so entsteht in ihm ein Drehfeld, dessen Geschwindigkeit der Schlüpfung des Induktionsmotors proportional ist. In der X_2-Wicklung tritt daher eine EMK ε'_{x_2} auf, die dem Induktionsfluß Φ_{x_2} um 90° und daher dem

Φx_2 erregenden Strome Ix_2 um etwas mehr als 90° nacheilt, und eine entgegengesetzt gerichtete EMK $E''x_2$, vgl. Abb. 275. Wenn die Schlüpfung mäßig groß ist (15—25%) und der Phasenschieber schnell läuft, ist $E''x_2$ bedeutend größer als $E'x_2$. Die resultierende EMK Ex_2 eilt dann dem Strome Ix_2 um nahezu 90° voraus. Der Phasenschieber wirkt daher wie ein Kondensator. Läßt man Ix_2 in den linken oberen Quadranten fallen, wie in Abb. 275, so ergibt $E'x_2 \hat{+} E''x_2 \hat{+} Ex_2$ eine Resultierende, die bei geeigneter Größe von Ex_2 die Richtung von Ix_2 hat und den Spannungsverlust im ganzen Kreise darstellt. Im Phasenverschieber tritt, da der Ständer keine Wicklung besitzt, nur ein den Verlusten entsprechendes Drehmoment auf. Er muß daher durch einen kleinen Motor angetrieben werden.

Da der Strom Ix_2 der Belastung des Motors proportional ist, die Kompensierung bei schwacher Belastung aber stärker als bei Vollbelastung sein muß, so reicht sie bei schwacher Belastung nicht hin, wenn sie auf volle Belastung eingestellt ist. Man kann diesem Übelstande abhelfen, wenn man den Phasenschieber noch mit Schleifringen versieht, die an feste Punkte der Wicklung angeschlossen sind, und die Schleifringe über einen Reguliertransformator an das den Motor speisende Netz anschließt. Läuft der Phasenschieber nämlich in demselben Sinne und mit derselben Geschwindigkeit um, wie sein Drehfeld, so verschwinden die EMKe zwischen den Schleifringen und die Frequenz. Läßt man ihn gegen das Drehfeld mit einer der Schlüpfung des Hauptmotors proportionalen Geschwindigkeit laufen, so daß die Relativgeschwindigkeit, gegen das Drehfeld gemessen, gleich der Synchrongeschwindigkeit des Phasenschiebers ist, so ist die Frequenz der Spannungen zwischen den Schleifringen gleich der des Netzes. Die Schleifringe können nun über den Reguliertransformator, der die richtige Spannung herstellt, an das Netz angeschlossen werden. Diese Art des Phasenschiebers muß daher synchron mit dem Läufer des Motors laufen und entweder von ihm durch Zahnräder oder von einem kleinen Induktionsmotor angetrieben werden, dessen Primäranker an das Netz und dessen Sekundäranker an die Schleifringe des Hauptmotors angeschlossen ist.

Soll das Drehmoment des Hauptmotors unverändert bleiben, so müssen die Ströme und die EMKe im Läufer größer werden, mithin auch die Schlüpfung. Diese wächst bei Kompensation des Leistungsfaktors auf 1 um etwa 30%. Dafür wird der Primärstrom schwächer und vor allem das Netz vom Blindstrom entlastet (Vgl. Rüdenberg, ETZ 1913, S. 807, El. K. u. B. 1914, S. 425, Scherbius, ETZ 1915, S. 299.)

(542) Kommutatormotoren für Einphasenstrom. Der Ständer besitze stets eine X-Wicklung. Wir können dann folgende Grundformen unterscheiden.

1. Der Läufer besitzt nur eine Y-Wicklung, Abb. 276. Als Reihenschlußmotor mit Kompensationswicklung und mit Wendezähnen, Abb. 277, hat er große Bedeutung gewonnen.

2. Der Läufer besitzt eine kurzgeschlossene X-Wicklung und eine an einen äußeren Kreis angeschlossene Y-Wicklung, Abb. 278. Die beiden Wicklungen bestehen in Wirklichkeit nur in einer einzigen Kommutatorwicklung, die einerseits durch die X-Bürsten kurzgeschlossen ist, anderseits durch die Y-Bürsten von außen Strom erhält. Bei Kurzschluß der X-Bürsten kann zwischen den Y-Bürsten eine erhebliche Spannung bestehen.

Die Nebenschlußschaltung, Abb. 279, ist zuerst von Wightman (1892), die Reihenschlußschaltung, Abb. 280, zuerst von Latour (1900) vorgeschlagen. Die mittelbare Reihenschlußschaltung, Abb. 281, stammt von Winter und Eichberg und eignet sich besonders für die Geschwindigkeitsregulierung des Motors, der im übrigen Reihenschlußcharakteristik besitzt, vgl. Abb. 288. Die mittelbare Nebenschlußschaltung ist von den Felten-Guilleaume-Lahmeyer-Werken mit Erfolg ausgeführt worden. Sie ergibt einen Motor von konstanter Geschwindigkeit, der aber nicht anläuft. Daher verwendete genannte Firma eine selbsttätige Umschaltung, indem sie den Motor

in Reihenschlußschaltung anlaufen ließ. Sie sparte dabei den Transformator, indem sie die Ständerwicklung zugleich als die Wicklung eines einspuligen Transformators benutzte, Abb. 282. Der Motor läuft bei geöffnetem Schalter an; wenn die volle Geschwindigkeit erreicht ist, wird der Schalter selbsttätig durch Zentrifugalkraft geschlossen. Eine Regulierung der Geschwindigkeit ist bei dieser Schaltung unmöglich.

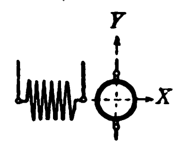


Abb. 276. Ständer-*X*- und Läufer-*Y*-Wicklung.

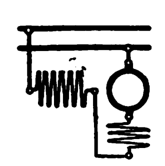


Abb. 277. Schaltung des Reihenschlußmotors mit Kompensationswicklung.

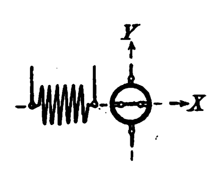


Abb. 278. Ständer-*X*-, Läuferkurzschluß-*X* und Läufer-*Y*-Wicklung. *X*-Wicklungen sind Arbeits-, *Y*-Wicklung ist Erregerwicklung.

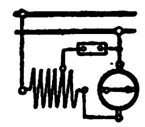


Abb. 279. Nebenschluß-Kurzschlußmotor (Wightman).

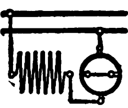


Abb. 280. Reihenschluß-Kurzschlußmotor (Latour).

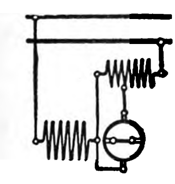


Abb. 281. Reihenschluß-Kurzschlußmotor mit Erregertransformator (Winter und Eichberg).

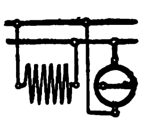


Abb. 282. Doppelschluß-Kurzschlußmotor (Osnos).

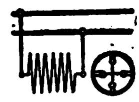


Abb. 283. Doppelkurzschlußmotor (Atkinson).

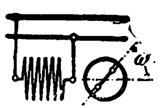


Abb. 284. Einfachkurzschlußmotor. (Repulsionsmotor.) (Elihu Thomson.)

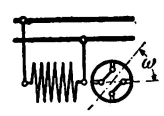


Abb. 285. Einfachkurzschlußmotor mit Doppelbürsten (Déri).

3. Der Läufer besitzt zwei kurzgeschlossene Wicklungen, die eine in der *X*-, die andere in der *Y*-Achse, Abb. 283. In Wirklichkeit ist wieder nur eine Kommutatorwicklung vorhanden, und es sind die *X*-Bürsten miteinander und ebenso die *Y*-Bürsten oder auch alle Bürsten miteinander kurzgeschlossen. Dieser von Atkinson (1898) vorgeschlagene Motor ist in seiner Wirkungsweise dem einphasigen Induktionsmotor gleichzustellen, er arbeitet jedoch weniger günstig als dieser. Hat er auf dem Ständer mehrphasige Wicklung, so ist sein Verhalten gleich dem des Mehrphasen-Induktionsmotors.

4. Der Läufer besitzt eine kurzgeschlossene Wicklung, die aber schräg zur X-Achse steht, Abb. 284. Die kurzgeschlossenen Bürsten sind verdrehbar angeordnet. Dieser von Elihu Thomson 1888 vorgeschlagene Motor ist von ihm Repulsionsmotor genannt worden. Stellt man die Bürsten in die X-Achse, so befinden sie sich in der Kurzschlußstellung, und der Motor hat kein Drehmoment. Verstellt man sie um 90° (bei mehrpoligen Motoren um $(90/p)°$), so befinden sie sich in der Leerstellung, und es fließt — abgesehen von den durch je eine Bürste kurzgeschlossenen Windungen — kein Strom im Läufer. Das Drehmoment verschwindet wieder. Verdreht man die Bürsten aus dieser Stellung in einer beliebigen Richtung, so läuft der Motor in der entgegengesetzten Richtung an. Déri hat diesen Motor durch Anordnung zweier Bürstensätze verbessert, indem er das eine Bürstenpaar in der X-Stellung stehen läßt, das andere verdreht, Abb. 285 (Schnetzler, ETZ 1907, S. 818 u. 1097). Es sind dann nur die Bürsten, die in der Anfangsstellung nebeneinander stehen, kurz miteinander verbunden. Die Achse der Läuferwicklung verstellt sich dann um den halben Betrag der Bürstenverstellung, und die Stromwärme im Läufer ist geringer. Der Motor hat Reihenschlußcharakteristik und entwickelt sein größtes Moment etwa bei 80—85° Verdrehung der Läuferachse aus der Leerlaufstellung, also bei (10—5°) Verdrehung, Winkel ω, Abb. 284 u. 285 aus der Kurzschlußstellung.

Die Bedienung dieses Motors ist besonders einfach, weil er keines Anlassers und keines Regulierapparates für die Einstellung der Geschwindigkeit bedarf.

(543) Diagramm des Einphasen-Induktionsmotors. (Görges, ETZ 1903, S. 271. — Sumec, Z. f. El. 1903, S. 517.) Infolge der Rotation des Ankers im X-Felde entwickelt sich ein Querfeld $\Phi_{y_2} = OA$, Abb. 286, das durch den Strom I_{y_2} erzeugt wird. In der kurzgeschlossenen Y_2-Wicklung müssen die beiden EMKe $E_{y_2}' = OB$ und $E_{y_2}'' = BC$ nahezu gleich groß und einander entgegengesetzt gerichtet sein. Es ist nämlich

$$OC = I_{y_2} R_2 = E_{y_2}' \hat{+} E_{y_2}''.$$

Die Phase von $I_{y_2} R_2$ ergibt sich daraus, daß I_{y_2} eine geringe Voreilung vor Φ_{y_2} haben muß. Φ_{x_2} hat bei positiver Drehrichtung gleiche Phase mit $BC = E_{y_2}''$. Da auch die X_2-Wicklung kurz geschlossen ist, so ist ebenso

$$I_{x_2} R_2 = E_{x_2}' \hat{+} E_{x_2}''.$$

Bei positiver Drehrichtung ist $E_{x_2}'' = DE$ parallel mit Φ_{y_2}, aber entgegengesetzt gerichtet, während $E_{x_2}' = OD$ 90° Verdrehung im Sinne des Uhrzeigers gegen Φ_{x_2} besitzen muß. Dadurch ist die Phase von $OE = I_{x_2} R_2$ und von I_{x_2} festgelegt. Die Vektoren der Induktionsflüsse Φ_{x_2}, Φ_{xL} und Φ_{x_1} sowie die von I_1 und P_1 der Ständerwicklung können nun nach (331) konstruiert werden.

Nimmt man an, daß I_{y_2} und Φ_{y_2} gleiche Phasen haben, so ist

$$E_{y_2}' = E_{y_2}'' \sin OCB = E_{y_2}'' \sin\alpha,$$

und daraus folgt, da $\quad E_{y_2}' = c\,\Phi_{y_2}$ und $E_{y_2}'' = vc\,\Phi_{x_2}$,

$$\Phi_{y_2} = v\,\Phi_{x_2} \sin\alpha.$$

$\sin\alpha$ ist nahezu gleich Eins. Der Querfluß Φ_{y_2} ist daher der Geschwindigkeit proportional und bei Synchronismus nahezu gleich Φ_{x_2}.

Im allgemeinen sind zwei Drehmomente vorhanden, ein großes positives $(\Phi_{y_2} I_{x_2})$ und ein kleines negatives $(\Phi_{x_2} I_{y_2})$. Bei Synchronismus $(v = 1)$ ist

$$\Phi_{y_2} = \Phi_{x_2} \sin\alpha,$$

und da $\quad E_{x_2}' = c\,\Phi_{x_2}$ und $E_{x_2}'' = vc\,\Phi_{y_2}$,

so erhält man $\quad E_{x_2}'' = E_{x_2}' \sin\alpha.$

Der Vektor I_{x_2} fällt dann in die Richtung von OB. In diesem Falle bleibt nur das kleine negative Drehmoment $(\Phi_{x_2} I_{y_2})$ bestehen. Mit wachsender Schlüpfung wird E_{x_2}'' proportional mit v^2 kleiner, infolgedessen wächst I_{x_2}, während der Winkel β kleiner wird. Das positive, vom Querfluß Φ_{y_2} erzeugte Drehmoment wächst daher schnell bis zu einem Maximum, das eintreten muß, weil zugleich Φ_{y_2} mit v abnimmt. Von da an nimmt das Drehmoment bis zum Werte Null ab, der bei Stillstand erreicht wird. Der Widerstand im Läufer muß möglichst gering sein, damit sich ein starker Querfluß ausbilden kann.

Mit Vergrößerung des Widerstandes sinkt das Drehmoment schnell, eine Regulierung der Drehzahl durch Einschaltung von Widerständen in den Sekundäranker, wie bei Mehrphasenstrom, ist daher unmöglich. Bei Übersynchronismus läuft der Motor als Generator. Die Ankerstromwärme ist prozentual bei normalem Betriebe etwa gleich der doppelten Schlüpfung und geht bei Synchronismus durch ein Minimum. Die Leistung ist etwa 60—70% von der eines gleich großen Drehstrommotors, der Wirkungsgrad einige Prozent geringer. Sumec hat aus diesem Diagramm ein Kreisdiagramm abgeleitet.

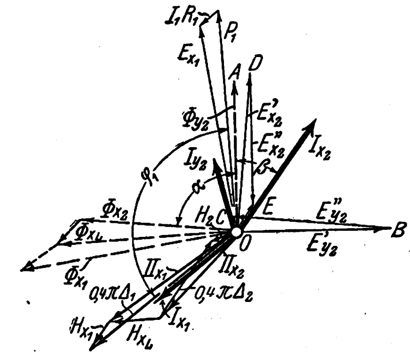


Abb. 286. Vektordiagramm des Einphaseninduktionsmotors.

Setzt man in den Gleichungen (538) $\Phi_{y_2} = v\,\Phi_{x_2}$, so erhält man

$$D = \frac{\varepsilon^2}{2\pi}\,\frac{m_2{}^2}{R_2}\,f\,\Phi_{x_2}{}^2\,(1-v^2)\,v,$$

$$W_2 = \varepsilon^2\,\frac{m_2{}^2}{R_2}\,f^2\,\Phi_{x_2}{}^2\,(1-v^2)^2,$$

$$N_{mech} = \varepsilon^2\,\frac{m_2{}^2}{R_2}\,f^2\,\Phi_{x_2}{}^2\,(1-v^2)\,v^2,$$

$$N_2 = \varepsilon^2\,\frac{m_2{}^2}{R_2}\,f^2\,\Phi_{x_2}{}^2\,(1-v^2).$$

Hieraus folgt $W_2/N_2 = (1-v^2) = (1+v)(1-v)$ oder, wenn v nahezu gleich 1, $W_2/N_2 \approx 2(1-v)$, d. h. die Stromwärme im Läufer ist prozentual gleich der doppelten Schlüpfung, also doppelt so groß wie beim Mehrphasenmotor.

(544) Diagramm des Reihenschlußmotors[1]. (Abb. 287). Der Strom I erzeugt in der X-Richtung die Induktionsflüsse Φ_{x_1} im Ständer und Φ_{x_2} im Läufer, die um den Streufluß voneinander verschieden sind; ferner in der Y-Richtung Φ_{y_2} im Läufer. Diese Flüsse haben alle dieselbe Phase wie I, wenn man von der Hysterese und den Wirbelströmen im Eisen, sowie von der Wirkung der Kurzschlußströme in der Kommutierungszone absieht. Diese haben zur Folge, daß I eine Voreilung vor Φ_{x_2} erhält. Das Drehmoment $(I_{y_2} = I,\ \Phi_{x_2})$ ist bei Stillstand bedeutend, da beide Vektoren dieselbe Richtung haben, und nach (534) negativ. Der Motor läuft daher im Sinne des Uhrzeigers mit großer Kraft an. Φ_{x_1} erzeugt im Ständer die EMK E_{x_1}' mit 90° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_1}, Φ_{x_2} im Läufer E_{y_2}'' mit 180° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_1}, Φ_{y_2} im Läufer E_{y_2}' mit 90° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_2}. Die Vektordifferenz $E_{x_1}' \mathbin{\widehat{-}} IR_1$ ist gleich der Klemmenspannung P_{x_1} des Ständers, die Vektorsumme $E_{y_2}' \mathbin{\widehat{+}} E_{y_2}'' \mathbin{\widehat{-}} IR_2$ gleich der Klemmenspannung P_{y_2} des Läufers. Die Vektorsumme $P_{x_1} \mathbin{\widehat{+}} P_{x_2}$ ist gleich P. Durch eine Kompensationswicklung, die vom Strome I gespeist wird, kann man Φ_{y_2} aufheben und zugleich auch ein geeignetes kommutierendes Feld schaffen. Die Klemmenspannung sinkt dann von P auf P' und die Phasenverschiebung von φ auf φ'. Die Kompensationswicklung kann auch kurz geschlossen werden, sie ist dann aber

[1] Heubach, Der Wechselstrom-Serienmotor. Voitsche Samml. 1903.

nicht so wirksam. Zur Verbesserung der Kommutierung werden gewöhnlich noch Wendezähne angebracht. Die Anordnung entspricht dann ungefähr der Abb. 185 (386).

Zur Erzielung eines großen Leistungsfaktors ist es nötig, daß $E_{x_1}' \hat{+} E_{y_2}'$ klein, E_{y_2}'' dagegen möglichst groß sei. Die Frequenz ist daher gering 15 bis 25 Per/s), die Geschwindigkeit groß zu wählen. Der Motor wird daher zweckmäßig mit so viel Polen gebaut, daß er mit etwa dem Doppelten der synchronen Geschwindigkeit läuft. Dies ergibt dünne Joche, daher geringes Gewicht und bei gegebenem Raum größeren Ankerdurchmesser, also erhöhte Leistung.

Das Drehmoment ist wie beim Gleichstrom nur von der Stromstärke abhängig und nimmt bei konstanter Spannung mit zunehmender Drehzahl ab, jedoch wegen der Leerkomponenten der EMK nicht in so starkem Maße wie bei Gleichstrom. Umgekehrt ändert sich die Geschwindigkeit mit dem Drehmoment in noch stärkerem Maße als beim Gleichstrommotor.

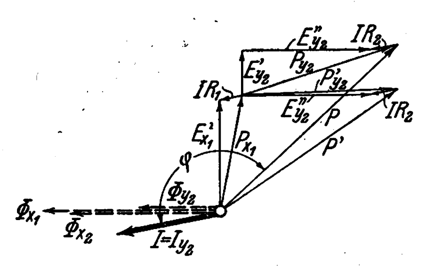


Abb. 287. Vektordiagramm des Reihenschlußmotors.

Mit Rücksicht auf gute Kommutierung wird der Motor nur für Spannungen bis etwa 300, bei den größten Leistungen bis 500 V gebaut, Abb. 312.

(545) Verhalten des Motors von Latour, Winter u. Eichberg. Im einfachsten Falle ist der die Ständerwicklung durchfließende Strom I zugleich der Strom I_{y_2} in der Y-Wicklung des Läufers, Abb. 280. Er erzeugt einen Induktionsfluß in der Y-Achse, den Hauptfluß, während die kurzgeschlossene X_2-Wicklung nur schwache Induktionsflüsse Φ_{x_1} und Φ_{x_2} aufkommen läßt.

Bei Stillstand kann der Y-Fluß nicht auf die X-Wicklungen wirken, weil die Achsen des Induktionsflusses Φ_{y_2} und der X-Wicklungen senkrecht aufeinander stehen. Die X-Wicklungen bilden einen kurzgeschlossenen Transformator, dessen Diagramm nach (331) gezeichnet werden kann. Es ergeben sich dann zwei negative Drehmomente, ein geringes und ein großes. Der Motor läuft daher mit großer Kraft im Sinne der Uhrzeigerdrehung an. Φ_{x_2} ist sehr klein, da die von ihm erzeugte EMK

$$E_{x_2}' = \sqrt{2} \cdot f m_2 \Phi_{x_2} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

nur den Spannungsverlust $I_{x_2} R_2$ zu decken hat. Φ_{x_1} unterscheidet sich nur um die Streuung von Φ_{x_2}, demnach ist die Spannung an der Ständerwicklung gering. Die Y-Wicklung des Läufers erzeugt einen starken Induktionsfluß und wirkt wie eine Drosselspule. In ihr tritt daher eine große EMK auf. Die Phasenverschiebung ist bedeutend.

Wenn der Motor läuft, tritt in der kurzgeschlossenen X-Wicklung noch eine EMK

$$E_{x_2}'' = v \cdot \sqrt{2} \cdot f m_2 \Phi_{y_2} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

auf. Diese muß, da die resultierende EMK wieder nur $I_{x_2} R_2$ zu decken hat, nahezu ebenso groß wie E_{x_2}' und entgegengesetzt zu ihr gerichtet sein. Es ist also nahezu bei allen Geschwindigkeiten

$$\Phi_{x_2} = v \cdot \Phi_{y_2},$$

dabei müssen Φ_{x_2} und Φ_{y_2} stets nahezu 90° Phasenverschiebung gegeneinander besitzen. Diese Beziehung haben wir schon bei dem einphasigen Induktionsmotor (543) kennen gelernt. Ist $E_{x_2}'' > E_{x_2}'$, oder $\Phi_{x_2} < v \Phi_{y_2}$, so ist das Drehmoment

negativ, der Motor läuft dann als Generator. Es bildet sich also ein umlaufendes magnetisches Feld aus, das bei Synchronismus ($v = 1$) am besten ausgebildet ist. Daher ist dann auch die Kommutierung am besten. Der Motor läuft daher am günstigsten in der Gegend der synchronen Geschwindigkeit.

Bei Stillstand ist die Spannung am Ständer sehr gering, am Läufer groß, mit zunehmender Geschwindigkeit wird die Ständerspannung größer, die Läuferspannung geringer. Letztere erreicht etwa bei Synchronismus ihren geringsten Wert und wird dann wieder größer.

Der Motor hat ausgesprochenen Reihenschlußcharakter. Er läuft mit großer Kraft an. Sein Drehmoment ist nur von der Stromstärke abhängig und wird mit wachsender Stromstärke geringer.

Wird durch Anwendung eines Transformators nach Winter und Eichberg (Abb. 281) der Erregerstrom abgeschwächt, was durch Vergrößerung der sekundären Windungszahl des Transformators geschieht (die Durchflutungen müssen primär und sekundär stets nahezu gleich groß bleiben), so kann man statt dessen annehmen, die Stromstärke I_{y2} sei dieselbe geblieben, die Windungszahl m_2 der Y_{y2}-Wicklung aber verkleinert worden. Vergl. (531).

Verkleinert man das Übersetzungsverhältnis m_1/m_2 des Transformators, so wird bei konstanter Spannung die Stromstärke im Ständer und das Drehmoment größer oder bei gleichem Drehmoment die Geschwindigkeit größer. Man kann den Reguliertransformator so abstufen, daß man bei verschiedenen Geschwindigkeiten immer mit einem sehr hohen Leistungsfaktor arbeitet. Dreht sich der Motor in umgekehrter Richtung, so wird die aufgenommene Leistung bei einer bestimmten Geschwindigkeit zu Null und darüber negativ. Der Motor verwandelt sich dann in einen Generator. Er erregt sich dabei sogar selbst, die Frequenz hängt von den elektrischen und magnetischen Größen des Motors ab. (Schmitz, S. 335.)

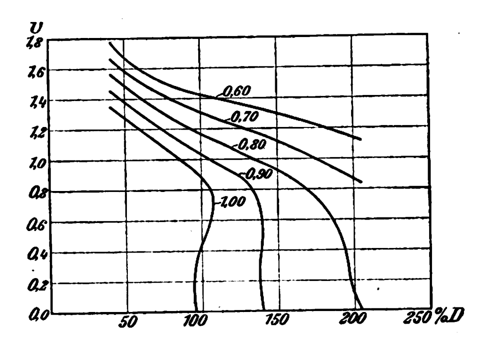


Abb. 288. Verhalten des Latour-Winter-Eichberg-Motors, bei konstanter Spannung und verschiedenen Übersetzungsverhältnissen m_1/m_2 des Transformators.

Abb. 288 zeigt die Kurven der Geschwindigkeit bei verschiedenen Übersetzungsverhältnissen.

Der Motor läßt sich für Spannungen von etwa 300 bis 800 V ausführen, je nach seiner Größe. Er ist dem Reihenschlußmotor gegenüber im Nachteil, weil er bei gleicher Geschwindigkeit mit weniger Polen gebaut werden muß und daher ein größeres Gewicht erhält. Abb. 313.

(546) Verwendet man diesen Motor in Nebenschlußschaltung, so bleiben die Bedingungen, daß Φ_{y2} und Φ_{x2} nahezu 90° miteinander einschließen müssen und daß $\Phi_{x2} \approx v\,\Phi_{y2}$ ist, bestehen. Der Motor läuft dann nur in der Nähe des Synchronismus, er hat also Nebenschlußcharakteristik. Dabei ist, wie wir gesehen haben, P_{x1} verhältnismäßig groß, P_{y2} verhältnismäßig klein.

(547) Der Repulsionsmotor (Abb. 289 bis 291). Der Repulsionsmotor hat, wie der Drehstrom-Kommutatormotor, zwei ausgezeichnete Stellungen, die Leerstellung und die Kurzschlußstellung. In der Leerstellung steht die Verbindungslinie der Bürsten senkrecht zum X-Feld, die Läuferwicklung ist dann stromlos; in der Kurzschlußstellung fällt sie mit der Richtung des X-Feldes

zusammen, beide Wicklungen wirken dann wie die eines kurzgeschlossenen Transformators aufeinander. Verschiebt man die Bürsten aus der Leerstellung in einer beliebigen Richtung, so läuft der Motor in der entgegengesetzten Richtung an. Der Motor hat Reihenschlußcharakter, doch ist seine Geschwindigkeitsänderung bei einer Änderung des Drehmomentes nicht so groß, wie beim Reihenschlußmotor.

Nach Déri wird der Motor mit zwei Bürstensätzen versehen, von denen der eine feststeht, der andere verstellbar ist. In der Leerstellung stehen die miteinander kurz verbundenen Bürsten nebeneinander auf denselben Kommutatorteilen. Diese Anordnung hat die Vorteile, daß die Bürstenverschiebung doppelt so groß wie bei einfachen Bürsten ist, und daß in der Leerstellung keine Ströme in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Windungen auftreten können, während bei einfachen Bürsten die kurzgeschlossenen Windungen die Sekundärwicklung eines Transformators bilden, dessen Primärwicklung die Ständerwicklung ist. Endlich ist die Stromwärme im Läufer etwas geringer, weil niemals alle Windungen vom Strome durchflossen werden. Nachteilig ist die doppelte Zahl Bürsten. Abb. 314.

Der Repulsionsmotor wird viel zum Antrieb von Spinnereimaschinen und Aufzügen verwendet.

(548) Diagramm des Repulsionsmotors[1]). Abb. 289. Denkt man sich den Repulsionsmotor, Abb. 284 mit einer X_2- und einer Y_2-Wicklung (532) auf dem Läufer, die in Reihe geschaltet und kurz geschlossen sind, so daß sie den gemeinsamen Strom I_2 führen, so richtet sich der Winkel ω der Verdrehung der Bürsten aus der Kurzschlußstellung der wahren Wicklung nach dem Verhältnis der Windungszahlen m_{x_2} und m_{y_2} der beiden Ersatzwicklungen. Es ist

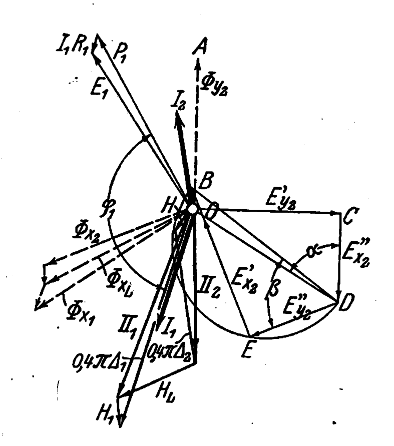


Abb. 289. Vektordiagramm des Repulsionsmotors.

$$\operatorname{tang} \omega = \frac{m_{y_2}}{m_{x_2}}.$$

Bei Stillstand treten in der ganzen Läuferwicklung nur die beiden EMKe E_{x_2}' und E_{y_2}' auf, die wegen des Kurzschlusses der Wicklung nahezu gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sein müssen. Dasselbe gilt von den Induktionsflüssen Φ_{x_2} und Φ_{y_2}. I_2 hat aber mit Φ_{y_2} nahezu gleiche Phase, weil es der einzige Strom ist, der für die Erzeugung von Φ_{y_2} in Betracht kommt. Die Drehmomente $(\Phi_{y_2} I_2)$ und $(\Phi_{x_2} I_2)$ sind daher beide positiv und fast gleich groß. Der Motor läuft daher mit großer Kraft in positiver Richtung an. Die Bürsten sind dazu aus der Leerstellung in negativer Richtung verschoben worden.

Wenn der Motor läuft, treten noch E_{x_2}'' und E_{y_2}'' infolge der Rotation auf. Es muß nun

$$E_{y_2}' \widehat{+} E_{x_2}'' \widehat{+} E_{y_2}'' \widehat{+} E_{x_2}' = I_2 R_2$$

sein. $I_2 R_2 = OB$ ist klein und hat wegen der Eisenverluste eine geringe Voreilung vor Φ_{y_2}, $E_{y_2}' = OC$ steht rechtwinklig auf $OA = \Phi_{y_2}$, $E_{x_2}'' = CD$ ist parallel zu OA und ihm entgegengesetzt gerichtet, weil der Drehungssinn positiv ist.

[1]) Literatur siehe S. 335.

Die beiden EMKe E_{y_2}'' und E_{x_2}' müssen die Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks über BD als Hypotenuse bilden. Nun ist

$$OC = E_{y_2}' = c\, m_{y_2} \Phi_{y_2}, \qquad CD = E_{x_2}'' = v \cdot c\, m_{x_2} \Phi_{y_2},$$

$$DE = E_{y_2}'' = v \cdot c\, m_{y_2} \Phi_{x_2}, \qquad EB = E_{x_2}' = c\, m_{x_2} \Phi_{x_2}.$$

Daher
$$\operatorname{tang} ODC = \operatorname{tang} \alpha = \frac{OC}{CD} = \frac{m_{y_2}}{v\, m_{x_2}} = \frac{\operatorname{tang}\omega}{v},$$

$$\operatorname{tang} BDE = \operatorname{tang} \beta = \frac{EB}{DE} = \frac{m_{x_2}}{v\, m_{y_2}} = \frac{1}{v \operatorname{tang}\omega}.$$

Der Punkt E auf dem Halbkreis über BD kann daher leicht gefunden werden. Die Vektoren von Φ_{xL} und Φ_x, sowie von E_1 und P_1 können dann wie im Transformatordiagramm (331) konstruiert werden.

Besonders übersichtlich wird das Diagramm, wenn man $I_2 R_2$ vernachlässigt und B mit O zusammenfallen läßt. Dann ist

$$(m_{y_2}{}^2 + v^2 m_{x_2}{}^2)\, \Phi_{y_2}{}^2 = (m_{x_2}{}^2 + v^2 m_{y_2}{}^2)\, \Phi_{x_2}{}^2,$$

oder
$$(\operatorname{tang}^2\omega + v^2)\, \Phi_{y_2}{}^2 = (1 + v^2 \operatorname{tang}^2\omega)\, \Phi_{x_2}{}^2.$$

Bei beliebigem ω folgt hieraus für

$$\text{Synchronismus } (v=1)\quad \Phi_{x_2} = \Phi_{y_2},$$

$$\text{Stillstand } (v=0)\quad \Phi_{x_2} = \Phi_{y_2} \cdot \operatorname{tang}\omega.$$

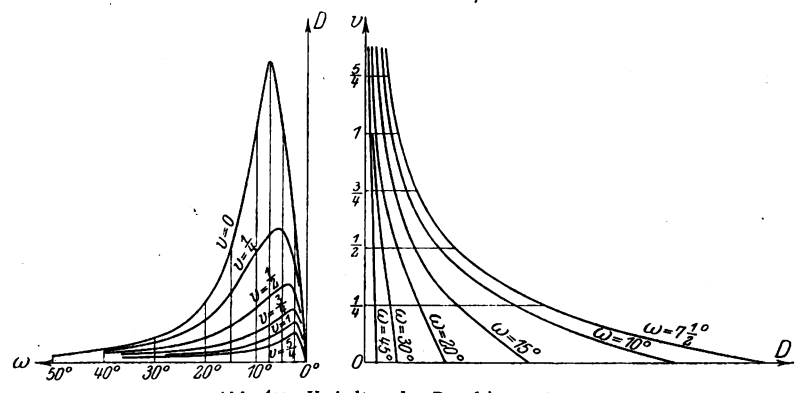


Abb. 290. Verhalten des Repulsionsmotors.

Für $\omega = 45°$ ist bei jeder Geschwindigkeit $\Phi_{x_2} = \Phi_{y_2}$. In diesem Falle haben Φ_{x_2} und Φ_{y_2} außerdem bei Synchronismus 90° Phasenverschiebung, es besteht dann also ein Drehfeld, das in demselben Sinne umläuft wie der Anker, so daß die Kommutierungsverhältnisse günstig werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit dreht sich, bei fester Lage von Φ_{y_2}, Φ_{x_2} im Sinne des Uhrzeigers. Bei Stillstand sind Φ_{x_2} und Φ_{y_2} einander genau entgegengerichtet, bei Synchronismus schließen sie einen Rechten miteinander ein und bei unendlich großer Geschwindigkeit fallen sie in dieselbe Richtung. Das Drehmoment ($\Phi_{x_2} I_2$) wird dabei immer kleiner, ist bei Synchronismus gleich Null und wird dann negativ. Das Gesamtdrehmoment sinkt daher von Stillstand bis zum Synchronismus bis auf die Hälfte und wird bei unendlich großer Geschwindigkeit zu Null. Eine Phasenverschiebung bleibt in der Ständer-

wicklung zwischen Spannung und Stromstärke immer bestehen, der Leistungsfaktor kann daher nie den Wert Eins erreichen.

Aus dem Diagramm ergibt sich, wenn man den Widerstand des Läufers R_2 gleich Null setzt, für das Drehmoment der Ausdruck

$$D = C \cdot \Phi_{x_2}{}^2 \frac{1 + \operatorname{tang}^2 \omega}{(v^2 + \operatorname{tang}^2 \omega) \operatorname{tang} \omega},$$

der, abgesehen von kleinen Werten für ω, gute Übereinstimmung mit den wahren Werten zeigt. Abb. 290 zeigt links den Verlauf des Drehmoments als Funktion der Bürstenstellung ω bei verschiedenen Geschwindigkeiten, rechts die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Drehmoment bei verschiedenen Bürstenstellungen.

In der Betriebsstellung müssen die Bürsten sehr weit, um 75° bis 82° bei einfachen Bürsten, aus der Leerstellung verschoben sein.

(549) Elektrische Verstellung der magnetischen Achse. Die Bürstenverstellung ergibt ein sehr einfaches Mittel, den Motor stoßfrei in Gang zu setzen und seine Geschwindigkeit zu regeln. Bei kleinen Motoren kann man statt dessen die magnetische Achse des Ständers auf elektrischem Wege verstellen. Schüler benutzt dazu, Abb. 291, eine in Stern geschaltete Drehstromwicklung auf dem Ständer, von denen mit Hilfe eines Umschalters entweder die Zweige *I* und *III* oder die Zweige *II* und *III* eingeschaltet werden. Dadurch wird die magnetische Achse des Ständers um ±30° aus der Mittelstellung verstellt, in der sie mit der Verbindungslinie der Bürsten zusammenfällt. Wählt man die Windungs- und Nutenzahlen für die Zweige *I* und *II* geringer, so kann man auch um kleinere Winkel verstellen. Derartige Motoren werden viel für Aufzüge verwendet. (Vgl. Schüler, ETZ 1903, S. 565. — Thomälen, Z. f. el. B. u. B. 1913, S. 453).

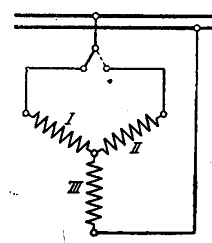


Abb. 291. Elektrische Verstellung der magnetischen Achse im Ständer des Repulsionsmotors.

(550) Kommutierung. Für die Kommutierung gelten die früher entwickelten Gesichtspunkte, vgl. besonders auch (396). Es kommt aber folgende Schwierigkeit hinzu. Der Induktionsfluß Φ_{x_2} induziert in den bei der Kommutierung durch die *Y*-Bürsten kurzgeschlossenen Windungen eine EMK E_{kx}', die 90° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_2} besitzt; ebenso entsteht eine EMK E_{ky}', wenn *X*-Bürsten vorhanden sind. Um diese EMKe zu kompensieren, benutzt man EMKe E_k'', die durch besondere Wendeinduktionsflüsse Φ_k von gleicher Phase mit E_k'' erzeugt werden. Im vollkommenen Drehfeld findet diese Kompensation ohne besondere Wicklungen statt. Der Latoursche Motor und der Repulsionsmotor laufen daher besonders gut in der Nähe des Synchronismus. Bei jenem sind es besonders die kurz miteinander verbundenen *X*-Bürsten, die zum Feuern neigen, während die *Y*-Bürsten Windungen kurzschließen, deren Achse mit der Achse der dauernd kurzgeschlossenen X_2-Wicklung zusammenfällt, und deswegen nicht zum Feuern neigen. (Vgl. Richter, ETZ 1911, S. 1258.) Man wendet daher für die Beseitigung des Feuers an den *X*-Bürsten dieses Motors ebenso wie an den *Y*-Bürsten des Reihenschlußmotors Wendezähne an und erregt diese so, daß sie einen Wendefluß von 90° Phasenverschiebung gegen den rechtwinklig dazu gerichteten Induktionsfluß erzeugen, was durch verschiedene Schaltungen möglich ist, z. B. dadurch, wenn auch nur unvollkommen, daß man einen Widerstand parallel zur Wicklung der Wendezähne schaltet. Bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit sind diese Wendezähne natürlich ohne Wirkung, in diesen Fällen ist daher Feuer an den Bürsten nicht zu vermeiden.

Ein weiteres Mittel, das Feuer an den Bürsten zu vermindern, besteht in Widerstandsverbindungen zwischen der Wicklung und dem Kom-

mutator. Von ihnen wird jedoch jetzt wenig Gebrauch gemacht, weil sie im Betriebe durch zu starke Erwärmung leicht Störungen verursachen; beim Latour-Winter-Eichberg-Motor dürfen sie überhaupt ebensowenig wie bei den einphasigen Induktionsmotoren angebracht werden, weil dadurch der Winkel α zwischen Φ_{x_2} und Φ_{y_2} verkleinert und die Wirkung des Motors stark beeinträchtigt wird.

(551) Bauausführung der Wechselstrommotoren. Wenn die Y-Komponente des Induktionsflusses für den Betrieb nicht erforderlich ist oder durch Kompensationswicklungen beseitigt wird, wie beim Reihenschlußmotor, kann der Ständer mit ausgeprägten Polen gebaut werden, er kann aber auch in diesem Falle als Ring mit innerer Nutung ausgeführt werden, vorausgesetzt, daß eine Kompensationswicklung angebracht ist, was praktisch immer geschieht. Beim Reihenschlußmotor wird die Erregerwicklung häufig konzentriert in je zwei größeren Nuten, die Kompensationswicklung verteilt in einer größeren Anzahl Nuten untergebracht. Außerdem findet man die vorher erwähnten Wendezähne. Der Ständer ist daher nach Abb. 185 gebaut. In allen Fällen, wo die Y-Komponente zum Betriebe notwendig ist, muß der Ständer als ein den Läufer möglichst ohne Unterbrechungen umschließender Ring gebaut werden. Dies ist bei den Mehrphasenmotoren, dem Latour-Winter-Eichberg- und dem Repulsionsmotor der Fall. Bei den Einphasenmotoren kann die Nutung da, wo der Φ_x-Fluß aus- und eintritt, fehlen, doch befinden sich beim Latourschen Motor an diesen Stellen Wendezähne. Die Wicklung des Ständers wird konstruktiv ähnlich wie die der Induktionsmotoren ausgeführt. Der Läufer besitzt eine normale Kommutatorschleifenwicklung, unter Umständen mit besonders ausgebildeten Widerstandsverbindungen. Der Kommutator wird meist mit sehr viel Teilen ausgeführt, so daß jedes Wicklungselement nur aus einer Windung besteht.

(552) Polzahlen. Der Latour-Winter-Eichberg- und der Repulsionsmotor laufen in der Nähe des Synchronismus am besten, beim Reihenschlußmotor kommt es dagegen wesentlich darauf an, daß er möglichst schnell läuft, damit E_{y_2}'' groß ist. Seine Geschwindigkeit darf daher ohne Bedenken den Synchronismus weit überschreiten, d. h. er kann eher mit einer größeren Zahl Pole ausgeführt werden als die anderen Motoren.

(553) Frequenz. Die Kommutatormotoren lassen sich für niedrigere Frequenzen vorteilhafter als für höhere bauen. Motoren nach Latour laufen mehrfach im Eisenbahnbetrieb mit 42 Per/s, doch werden sie auch besonders für niedrigere Frequenzen gebaut. Als normale Frequenzen sind 25 und $16^2/_3$ Per/s anzusehen. Für den Bahnbetrieb sind vielfach $16^2/_3$ Per/s als normal festgesetzt worden. Die Motoren können dann mit starker Sättigung in den Zähnen, bis zu etwa 16000 Gauß, arbeiten, die Bleche können dicker, bis zu 1 mm Stärke, genommen werden.

Stromumformungen.

(554) Arten der Umformer. Während die Transformatoren als ruhende Apparate auf Wechselstrom beschränkt sind und nur Spannung, Stromstärke und allenfalls die Phase des Stromes, aber, abgesehen von den Frequenztransformatoren, nicht den Charakter des Stromes als Wechselstrom von bestimmter Frequenz ändern, sind die Motorgeneratoren und die Umformer umlaufende Maschinen, die nicht auf Wechselstrom und die Änderung der Spannung beschränkt sind.

Die Motorgeneratoren dienen zur Umwandlung eines elektrischen Stromes in einen beliebigen andern und bestehen aus zwei miteinander direkt gekuppelten Maschinen, nämlich einem Motor für den primären und einem Generator für den sekundären Strom. Im Gegensatz zu ihnen versteht man unter Umformern Maschinen, bei denen die Umformung des Stromes in einem gemeinsamen Anker stattfindet. Man unterscheidet Umformer mit zwei von-

einander getrennten Wicklungen, z. B. von Gleichstrom in Gleichstrom anderer Spannung, und solche mit einer einzigen Wicklung, meist einer Kommutatorwicklung, an die zugleich 2—6 Schleifringe angeschlossen sind, zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt. (Wegen der Spaltpolumformer vgl. Fleischmann, ETZ 1908, S. 685 und Hallo, Arbeiten aus d. Elektrotechn. Inst. d. I. H. Karlsruhe, Bd. 2.)

Erregt werden die Umformer stets durch eine Nebenschluß- oder eine Doppelschlußwicklung, die von der Gleichstromseite aus oder von einer fremden Gleichstromquelle gespeist wird. Am verbreitetsten ist der Umformer mit einer geschlossenen Kommutatorwicklung zur Umformung von Mehrphasenstrom in Gleichstrom.

Der Umformer kann auch als Doppelgenerator zur gleichzeitigen Erzeugung beider Stromarten oder auch gleichzeitig als Umformer und Motor benutzt werden.

Der Kaskadenumformer ist eine Vereinigung eines Asynchronmotors mit einem Umformer durch direkte Kuppelung und eine besondere Schaltung.

Der Frequenzumformer wandelt Wechsel- oder Mehrphasenstrom auf eine andere Frequenz und Spannung um. Man denke sich den mit Gleichstrom erregten Feldmagnet ohne ausgeprägte Pole und ebenso den zugehörigen Anker mit je zwei Wicklungen für zwei verschiedene Polzahlen versehen. Den Bergmann-El.-Werken ist es gelungen, die beiden Wicklungen jedes Teiles zu einer einzigen zu vereinigen. Dem Anker kann man durch geeignete Anzapfungen Ströme verschiedener Frequenz entnehmen oder auch Leistungen von einer gegebenen Frequenz auf die einer anderen umformen.

(555) Verhalten der Umformer. Alle Umformer mit Ausnahme der Spaltpol- und Frequenzumformer haben ein festes, von Drehzahl und Belastung unabhängiges Übersetzungsverhältnis, weil nur ein magnetisches Feld vorhanden ist. Das Verhältnis der Spannungen ändert sich daher nur infolge des ohmschen Spannungsverlustes in der Ankerwicklung und der Verzerrung des magnetischen Feldes ein wenig. Wenn nur eine geschlossene Wicklung für Gleichstrom und Wechselstrom vorhanden ist, so werden die Schleifringe an solche Punkte der Wicklung angeschlossen, deren Potentiale (446) für n-Phasenstrom $360°/n$ Phasenverschiebung haben. Bei sinusartig verteiltem Felde verhalten sich daher die EMKe zwischen den Schleifringen zueinander wie die Sehnen zwischen den Anschlußpunkten. Setzt man die EMK bei Gleichstrom gleich Eins, so sind die EMKe E aus folgender Tabelle zu entnehmen.

Umformer für	Bei sinusförmig verteiltem Felde		Bei Polbreite zu Polteilung wie 1:2		2:3	
	E	$N\%$	E	$N\%$	E	$N\%$
Einphasenstrom . . .	$1/\sqrt{2} = 0{,}707$	85	0,82	95	0,75	88
Drehstrom	$\sqrt{3}/2\sqrt{2} = 0{,}612$	134	0,71	144	0,65	138
Vierphasenstrom . . .	$1/2 = 0{,}500$	164	0,58	170	0,53	167
Sechsphasenstrom . .	$1/2\sqrt{2} = 0{,}354$	196	0,42	190	0,37	198

Wenn der primäre Strom Gleichstrom ist, so läuft die Maschine als Gleichstrommotor und daher je nach der Erregung verschieden schnell. Die Frequenz des Wechselstromes ist daher veränderlich und von der Art und Größe der Belastung abhängig, da die Ankerrückwirkung des Wechselstromes je nach der Phasenverschiebung sehr verschieden ist (448). Bei starker Phasenverschiebung ist sogar ein Durchgehen des Umformers nicht ausgeschlossen. Unter Umständen sind daher selbsttätige Regulatoren erforderlich.

Ist der Wechselstrom oder Drehstrom die primäre Stromart, so läuft der Umformer als Synchronmotor und teilt dessen Eigenschaften. Er kann z. B.

gegen den Generator ins Schwingen geraten. Seine Eigenschwingungszahl liegt in der Regel zwischen denen der Grundschwingung und der ersten Oberschwingung. Man versieht ihn daher mit Dämpfungswicklung (474) oder mit einem Schwungrade.

(556) Der **Bau der Umformer** (vgl. auch ETZ 1912, S. 1014 u. ETZ 1913, S. 291) gleicht im wesentlichen dem der Gleichstrommaschinen. Der Kommutator wird auf der einen Seite, die Schleifringe werden auf der anderen Seite des Ankers angeordnet. Beide erhalten entsprechend der großen Leistung im Vergleich zum Anker große Abmessungen. Bei der Benutzung für einphasigen Wechselstrom entsteht ein so stark pulsierendes Feld, daß in massiven Polen große Verluste durch Wirbelströme und starke Erwärmung auftreten. Die Frequenz wird, wenn möglich, gleich 25 gewählt, da bei höherer Frequenz die Kommutierung und der Parallelbetrieb schwieriger und die Maschine teurer wird. Von Dämpferwicklung (474) und Wendepolen (385) wird viel Gebrauch gemacht.

(557) Die **Leistung der Umformer** ist wesentlich durch die Erwärmung begrenzt. Die Übereinanderlagerung des Gleichstromes und des Wechselstromes in derselben Ankerwicklung hat eine andere Stromwärmeleistung zur Folge, als wenn derselbe Gleichstrom allein im Anker fließt. Setzt man die Leistung im letzten Falle gleich Hundert, so ergibt sich die Leistung N des Ankers bei gleicher Stromwärmeleistung, wenn die Maschine als Umformer benutzt wird, nach Kapp aus obiger Tabelle.

Die Leistung ist bei Einphasenstrom geringer, bei Drehstrom und noch weit mehr bei Sechsphasenstrom größer als bei Entnahme von Gleichstrom. Es empfiehlt sich daher, Sechsphasenstrom zu verwenden; vgl. (447). Dies ist fast immer möglich, da die Umformer meistens zur Umwandlung von hochgespanntem Drehstrom in Gleichstrom benutzt werden, und dann wegen des festen Übersetzungsverhältnisses im Umformer die Vorschaltung von Transformatoren nötig ist. Anfang und Ende eines jeden Zweiges der Sekundärwicklung wird dann an Schleifringe angeschlossen, die mit gegenüberliegenden Punkten der zweipolig angenommenen Ankerwicklung verbunden sind, Abb. 292. Eine Verteuerung durch die größere Zahl von Schleifringen tritt kaum ein, weil die Summe der ihnen zugeführten Stromstärken und daher die gesamte Bürstenzahl bei gleicher Leistung ungefähr dieselbe bleibt wie bei Drehstrom mit drei Schleifringen, anderseits aber die Ausnützung der Maschine selbst bedeutend besser ist. Die Größe der zugeführten Stromstärke ergibt sich aus der Überlegung, daß jedes Schleifringpaar den dritten Teil der Leistung aufzunehmen hat und die Spannung zwischen zwei Schleifringen gleich dem $1/\sqrt{2}$fachen der Gleichstromspannung ist. Der Leistungsfaktor kann nahezu gleich Eins gehalten werden, da der Umformer als synchroner Motor läuft.

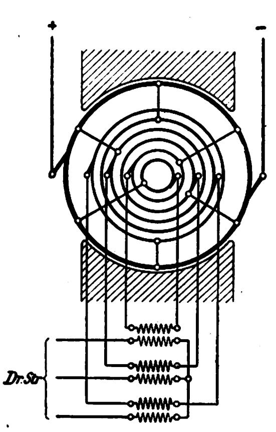


Abb. 292. Schaltung des Umformers mit Transformator.

(558) Der **Wirkungsgrad** der Umformer mit einer Wicklung ist sehr hoch und beträgt je nach der Größe 90 bis 95 %. Für die gesamte Umwandlung des Drehstroms in Gleichstrom ist dieser Wirkungsgrad noch mit dem der Transformatoren zu multiplizieren.

(559) **Spannungsregulierung** ist, da das Übersetzungsverhältnis konstant ist, nur dadurch zu erzielen, daß man entweder die zugeführte oder die gewonnene

Spannung ändert. Da in den Transformatoren durch Streuung ein induktiver Spannungsverlust entsteht, kann man diesen zu einer Spannungsregulierung um etwa 6 bis 10% benutzen. Die Phasenverschiebung des Drehstroms ist nämlich bei einer bestimmten Erregung gleich Null, bei größerer negativ, bei geringerer positiv (484). Dadurch ändert sich aber zugleich die Sekundärspannung des Transformators. Auch der induktive Spannungsverlust der Fernleitung wirkt in derselben Weise. Unter Umständen wird auch eine Drosselspule vor den Umformer geschaltet, um diese Wirkung zu erhöhen. Man kann daher durch Änderung der Erregung die Gleichstromspannung regulieren, entweder mit Hilfe eines Regulierwiderstandes oder durch Anordnung einer Doppelschlußwicklung auf dem Umformer.

Die A E G erzielt eine Veränderung der Spannung in weiteren Grenzen dadurch, daß sie den Wechselstrom, bevor er dem Umformer zufließt, durch den Anker eines direkt mit ihm gekuppelten kleineren Synchrongenerators mit veränderlicher Erregung schickt und dadurch die Primärspannung am Umformer erhöht.

(560) Anlassen der Umformer. Wenn Gleichstrom zur Verfügung steht, wird der Umformer von der Gleichstromseite aus mit einem Anlasser angelassen; für die Wechselstromseite gelten dann die Regeln des Parallelschaltens wie für Wechselstromgeneratoren (478). Steht kein Gleichstrom zur Verfügung, so muß der Umformer wie ein Wechselstromsynchronmotor in Gang gesetzt werden (486).

Insbesondere kommen folgende Verfahren in Betracht (vgl. Linke, ETZ 1915, S. 133):

1. Benutzung eines Anlaufmotors, der dem Umformer eine etwas größere als die synchrone Geschwindigkeit verleiht: Gleichstrommotor oder Induktionsmotor mit einer um 1 geringeren Polpaarzahl, als der Umformer besitzt.

2. Benutzung eines Asynchronmotors mit gleicher Polzahl. Sobald dieser die volle Geschwindigkeit erreicht hat, wird

a) entweder der Umformer über Schutzwiderstände oder Drosselspulen bei schwacher Selbsterregung ans Netz gelegt, so daß der Umformer in Tritt fällt, oder

b) der Induktionsmotor durch Gleichstromerregung des Läufers synchronisiert. Letzterer erhält zweckmäßig zwei Wicklungen, von denen die eine auf Anlaßwiderstände geschlossen, die andere bei normaler Geschwindigkeit durch Gleichstrom erregt wird.

3. Anlassen durch Anlegen eines Bruchteiles der normalen Spannung, etwa 20 bis 40 Hundertstel, an die Schleifringe. Der vorgeschaltete Transformator wird dazu mit geeigneten Anzapfungen versehen. Bürstenfeuer am Kommutator ist dabei nicht zu vermeiden. Um es zu vermindern, ist die Wendepolwicklung kurz zu schließen. Die Erregerwicklung ist über den Regulierwiderstand an den Anker zu legen. Auf der Primärseite des Transformators sind bei mittelgroßen Umformern (200 bis 600 kW) etwa 70 bis 100 Hundertstel des normalen Stromes erforderlich. Das Umschalten auf volle Spannung muß entweder sehr schnell oder mit einem Schalter mit Vorkontakt und Widerstandsstufe langsam in 1 bis 2 Sekunden geschehen.

Auf richtige Polarität des Umformers ist zu achten. Gegebenenfalls ist das Einschaltverfahren ein oder mehrere Male zu wiederholen.

(561) Der **Kaskadenumformer** von Bragstad und la Cour (vgl. Arnold und la Cour, Samml. elektrotechn. Vorträge, Bd. VI. — Hallo, D. Eigenschaften des Kaskadenumformers u. seine Anwendung. Dissertation, Karlsruhe 1910. ETZ 1910, S. 575) besteht aus einem asynchronen Motor und einem Umformer, deren Läufer auf derselben Welle sitzen (Abb. 320). Der Läufer des Motors speist den Anker des Umformers. Besitzen beide Teile gleiche Polzahl, so laufen sie mit der halben Geschwindigkeit des Drehfeldes; die eine Hälfte der dem Motor zugeführten Leistung wird in mechanische Leistung verwandelt und als solche dem Umformer zugeführt. die andere Hälfte wird in elektrische Leistung von der halben

Frequenz des Primärstromes transformiert und im Umformer in Gleichstrom umgesetzt. Diese Kombination gestattet dem Umformer bequeme Abmessungen zu geben, und eignet sich besonders für höhere Frequenz (50 bis 60 Per/s), da die Polzahl geringer gewählt werden kann.

Die Läuferwicklung des Induktionsmotors *A* wird als Sechs- oder Zwölfphasenwicklung ausgeführt, Abb. 293, die Anfänge der Wicklungsabteilungen werden direkt mit geeigneten Punkten der Läuferwicklung *B* des Umformers verbunden, die Enden zu mitlaufenden Klemmen geführt, die während des Ganges kurz geschlossen werden können. Zum Anschluß eines Anlassers werden außerdem drei Wicklungsabteilungen, die über die Wicklung des Umformers zusammenhängen und miteinander eine Drehstromwicklung bilden, zu drei Schleifringen geführt. Wenn der Induktionsmotor die Hälfte des Synchronismus, d. h. die normale Geschwindigkeit überschritten hat, wird der Umformer voll erregt. Die Geschwindigkeit sinkt dann wieder, und wenn ein an zwei Schleifringe angeschlossener Spannungszeiger auf Null zeigt, werden die Wicklungsabteilungen durch den mitlaufenden Kurzschließer zu einer Sternschaltung vereinigt. Der Umformer kann mit Selbsterregung ausgeführt werden, doch darf, damit er sich sicher erregt, der Nebenschlußregulierwiderstand keinen Kurzschlußkontakt besitzen. Andernfalls könnte die Geschwindigkeit bis auf das Doppelte steigen.

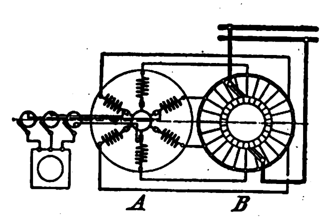


Abb. 293. Schaltung der Läufer des Kaskadenumformers.

In Dreileitersystemen kann man den Ausgleich dadurch herstellen, daß man den Nullpunkt des Induktionsmotors über einen Schleifring mit dem Mittelleiter verbindet. Die Gleichstromspannung kann durch die Erregung um etwa ±10% verändert werden. Der Wirkungsgrad erreicht etwa 91 bis 92%.

(562) Gleichrichter sind Apparate, die auf mechanischem oder chemischem Wege ein- oder mehrphasigen Wechselstrom in gleichgerichteten Strom verwandeln.

Umlaufende Gleichrichter sind von Liebenow (DRP Nr. 73053) und Pollak (ETZ 1894, S. 109) vorgeschlagen worden. Sie bestehen aus einem Kommutator in Verbindung mit Schleifringen, die auf einer gemeinsamen Welle sitzen und von einem kleinen Synchronmotor angetrieben werden. Bei dem Drehstrom-Gleichrichter der Siemens-Schuckert-Werke (ETZ 1912, S. 56) ist die sechsphasige Sekundärwicklung eines Drehstromtransformators an 12 Schleifringe angeschlossen. Der Kommutator besitzt 24 Teile, von denen der 1. und der 13. mit dem ersten, der 2. und der 14. mit dem zweiten Schleifring usw. verbunden ist. Der Synchronmotor ist vierpolig und läuft von selbst an. Der Gleichrichter wird bis zu etwa 6 kVA Drehstromleistung bei 120, 220 und 500 V und 50 Per/s gebaut.

Der oszillierende Gleichrichter von Koch (ETZ 1901, S. 853 und 1903, S. 841; gebaut von Nostiz u. Koch, Chemnitz, und von Koch u. Sterzel, Dresden) besteht aus einem polarisierten Anker, der durch einen Wechselstromelektromagnet in synchrone Schwingungen versetzt wird und den Stromkreis in den Augenblicken der Stromlosigkeit öffnet und schließt.

(563) Elektrolytische Gleichrichter[1]). Eine Aluminiumanode polarisiert sich in einem Elektrolyt — es kommen besonders Lösungen der Borate, z. B. des sauren

[1]) Pollak, C. R. Bd. 124, S. 1443, ETZ 1897, S. 358. — Graetz, Wied. Ann. Bd. 62, S. 323, ETZ 1897, S. 423. — Wilson, ETZ 1898, S. 615. — Norden, Zeitschr. f. Elektrochemie, 6. Jhrg., S. 159, wo auch die ältere Literatur angegeben ist. — Günther Schulze, El. u. Masch.-Bau, Wien 1909, Heft 11; Arch. f. El. Bd. 3, S. 43. — Siegl, ETZ 1913, S. 970.

borsauren Ammoniums $(NH_4)HBO_2$ in Betracht — so stark, daß sie dem Stromdurchgang bis zu einem kritischen Werte der Spannung, etwa 450 bis 530 V je nach der Beschaffenheit des Elektrolyts, einen sehr großen Widerstand entgegensetzt. Es bildet sich nämlich auf der Anode eine isolierende Haut von Aluminiumhydroxyd $Al_2(HO)_6$ und eine sehr dünne Gasschicht. Als Kathode dagegen bietet die Aluminiumplatte keinen erheblichen Widerstand. Solche Zellen wirken daher wie Ventile, indem sie den Strom nur in einer Richtung durchlassen, vorausgesetzt, daß die Spannung den kritischen Wert nicht überschreitet.

Der Wirkungsgrad dieser Gleichrichter ist sehr mäßig (60 bis 75%), die Haltbarkeit begrenzt, größere Anwendungen haben sie daher kaum gefunden. Dagegen werden solche Zellen in steigendem Maße als elektrische Ventile benutzt. Diese Zellen besitzen zugleich eine sehr erhebliche elektrostatische Kapazität.

(564) Quecksilberdampfgleichrichter (Cooper Hewitt)[1]. — Ein hoch evakuierter, oben mit einer Kühlkammer versehener Glaskolben enthält in seinem untersten Teile die Quecksilberkathode *D*, in mehreren Seitenarmen die aus Graphit oder Eisen hergestellten Anoden *A*, *B*, *C* und eine Hilfsanode *E* aus Quecksilber. *E* ist über einen Widerstand mit einer der Anoden verbunden. Die Schaltung

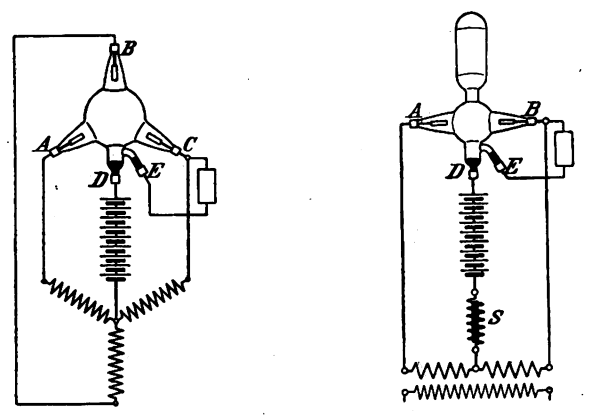


Abb. 294 u. 295. Quecksilberdampf-Gleichrichter von Cooper Hewitt.
Abb. 294 für Drehstrom. Abb. 295 für Einphasenstrom.

für Drehstrom zeigt Abb. 294, die für Einphasenstrom Abb. 295. Wenn die Kathode dauernd sehr heiß bleibt, so daß sie genügend viel Ionen zur Ionisierung des Gasweges aussenden kann, und die Anoden genügend gekühlt werden, so daß sie nicht zur Kathode werden können, wirkt die Vorrichtung wie ein Ventil, das nur Strom in der Richtung von den Graphitelektroden zum Quecksilber durchläßt. Zum Zünden wird die Lampe so oft gekippt, bis das von der Hilfsanode zur unteren Quecksilberelektrode überfließende Quecksilber einen Lichtbogen zieht, der sodann auf eine der Hauptanoden überspringt. Zu dem Gleichrichter gehört ein Transformator — häufig wird ein solcher mit Sparschaltung verwendet — von dessen Mittelpunkt man über den Stromaufnehmer zur Quecksilberkathode

[1]) Literatur: Günther Schulze, ETZ 1909 S. 295; 1910, S. 28. — Tschudy, Diss. Zürich 1912, besprochen von Günther Schulze, ETZ 1912, S. 1088. — v. Keller, ETZ 1909, S. 1180, 1225. — Hechler, ETZ 1910, S. 1053. — Béla Schäfer, ETZ 1910, S. 55; 1911, S. 2; 1912, S. 1164; 1914, S. 282. — Epstein, ETZ 1913, S. 1415. — Hartmann-Kempf, ETZ 1913, S. 253. — Nielsen, ETZ 1919, S. 224. — Arons, Wiedem. Ann. Bd. 47, 1899, S. 767. — Hewitt, Proc. Am. Inst. El. Eng. 12. 4. 1901.

gelangt, während die äußeren Enden direkt mit den Graphitanoden verbunden sind. Bei Einphasenstrom ist noch eine Drosselspule S erforderlich, damit der Strom an der Kathode nie verschwindet. Der Quecksilberdampf schlägt sich an den Wandungen der Kühlkammer nieder und rinnt von dort wieder nach unten. Der Spannungsverlust beträgt unabhängig von der Stromstärke 13 bis 20 V, der Wirkungsgrad ist daher um so höher, je höher die Betriebsspannung ist. Verluste treten außerdem nur noch im Transformator und in der Drosselspule auf.

Der Quecksilberdampfgleichrichter wird besonders zum Akkumulatorenladen und zum Betrieb von Bogenlampen in Reihenschaltung bis zu etwa 4000 V benutzt. Die Stromstärke eines Kolbens beträgt 3—40 A. Sinkt die Stromstärke unter einen Grenzwert, so wird der Stromkreis selbsttätig unterbrochen, was für Akkumulatorenladung angenehm ist. Als Lebensdauer eines Kolbens werden etwa 1200 h garantiert, häufig ist sie viel höher, bis über 10000 h.

Der Strom ist bei Akkumulatorenladung stark pulsierend, und zwar um so mehr, je schwächer die Wirkung der Drosselspule ist. Die gewonnene Leistung muß man daher, wenn es sich um Wärmewirkungen (Glühlampen) handelt, mit einem Dynamometer bestimmen; wenn es sich um elektrolytische Witkungen (Akkumulatoren) handelt, aus dem Produkt der mit Drehspulengeräten gemessenen Werte der Spannung und der Stromstärke berechnen. Bei Akkumulatorenladung muß der Maximalwert der nützlichen Ladespannung P_{max} die EMK der Akkumulatoren um den Spannungsverlust P_v im Verbrauchskreis einschließlich der Drosselspule übertreffen. Es ist also $P_{max} = E + P_v$. Rechnet man hierzu den Spannungsverlust von 14 V im Kolben, so folgt für die Amplitude der Spannung $P_0/2$ vom Nullpunkt bis zur Außenklemme der Sekundärwicklung des Transformators $\frac{1}{2}P_0 = P_{max} + 14$ oder $P_0 = 2(E + P_v + 14)$ und für den Effektivwert der Spannung $P = \sqrt{2} \cdot (E + P_v + 14)$. Rechnet man als Ladespannung einer Zelle 2,50 V, und nimmt man den Spannungsverlust in der Drosselspule zu 15 V an, so ist die Einphasenspannung der ganzen Sekundärwicklung zu $\sqrt{2} \cdot (150 + 15 + 14) = 253$ V anzunehmen.

Quecksilber-Groß-Gleichrichter (Béla Schäfer) besitzen nach der Bauart von Brown Boveri u. Cie. (Abb. 329) einen Brennraum A und einen Kondensationsraum B, die aus Stahlblech hergestellt sind. Beide sind mit einem Kühlmantel für Wasserkühlung versehen. Zur Abdichtung des Gefäßes dient Quecksilber zwischen Asbest und teilweise zwischen Gummi. Die starken eisernen Bolzen der Anoden sind in Porzellanisolatoren durch den Deckel des Brennraumes geführt, die Anoden selbst bestehen aus kräftigen Stahlstücken, die auf die Bolzen aufgeschraubt sind; zur Kühlung dienen bei größern Gleichrichtern Rippenkörper. Die Kathode ist durch einen Porzellanring isoliert im Boden des Brennraumes eingelassen. Der Gleichrichter erfordert eine Verdünnung von 0,01 bis 0,05 mm Quecksilbersäule, wozu eine rotierende Ölluftpumpe dient. Diese braucht nur während der ersten Betriebszeit dauernd mitzulaufen, da nach einigen Monaten alle Restgase aus dem Innern entfernt sind. Zur Messung der Verdünnung kann ein Spannungszeiger dienen, da ja der Widerstand der verdünnten Luft von der Verdünnung abhängig ist. Zur Zündung dient eine in der Mitte angeordnete Zündanode, die elektromagnetisch durch einen Hilfsgleichstrom heruntergezogen und bei dessen Unterbrechung durch eine Feder wieder hinaufgezogen wird. Der Zündlichtbogen benötigt etwa 5 A. Sinkt die Stromstärke im Gleichrichter unter 10 A, so erlischt der Lichtbogen, wenn nicht Fremderregung vorgesehen ist. Diese besteht in einer besonderen Erregeranode (Abb. 329 rechts), die z. B. durch eine kleine Akkumulatorenbatterie dauernd auf einem höheren Potential als dem der Anode gehalten wird. Das Einschalten ist nur unter Last möglich; es wird daher ein besonderer Belastungswiderstand für etwa 100 A vorgesehen. Drosselspulen dienen zur besseren Verteilung der Stromstärke, wenn mehrere Zylinder miteinander parallel geschaltet werden oder auch ein Zylinder mit anderen Stromerzeugern parallel arbeiten soll. Auf die Ver-

meidung der Rückzündung ist besonderer Wert gelegt, die Anoden dürfen nur in Rotglut geraten, während die Kathode weißglühend wird (Temperatur etwa 3000°). Die Lichtbogen werden in Metallrohren geführt, so daß die Anoden nicht von herabrinnenden Quecksilbertropfen benetzt werden können.

Die normalen Stromstärken sind 250 und 500 A. Bei höherem Strombedarf schaltet man 2 oder mehr Gleichrichter parallel. Gegen Belastungsstöße sind die Gleichrichter unempfindlich; sie haben sich z. B. sehr gut beim Betriebe elektrischer Bahnen bewährt. Der Wirkungsgrad beträgt bei 110 V etwa 84%, bei 500 V 96%, bei 1000 V 98% und ist von der Belastung unabhängig. Daraus ergibt sich bei zeitweise schwacher Belastung ein guter Jahreswirkungsgrad.

Regulierwiderstände und Anlasser.

(565) Aufbau der Regulierwiderstände. Die Regulierwiderstände werden häufig aus Spiralen von Rheotan-, Nickelin-, Kruppin-, Chromnickeldraht hergestellt, die mit Porzellanrollen oder durch Schieferplatten an einem Eisengestell befestigt oder in Email oder dgl. eingebettet werden. Dünne Drähte werden auf Porzellanzylinder gewickelt, die mit Gewinde versehen sind. Die Widerstandskörper werden in einem Gehäuse aus gelochtem Blech untergebracht, um der Luft freien Zu- und Austritt zu gewähren, oder in Öl versenkt. An der vorderen Seite wird in der Regel der Stufenschalter angeordnet, der aus den auf einem Kreisbogen oder ganz im Kreise angeordneten, häufig auf einer Schieferplatte montierten Kontaktknöpfen besteht, über die die Schaltkurbel hinweggleitet. Beim Einbau in Schaltanlagen wird der Widerstand mit dem Stufenschalter zweckmäßig hinter der Schalttafel angeordnet und von vorn durch ein Handrad bedient. Außer dieser einfachsten Anordnung gibt es zahlreiche andere Konstruktionen, z. B. Stufenschalter, die nach Art eines flachen oder auch zylindrischen Kommutators gebaut sind.

Die Beanspruchung des Drahtmaterials ist so zu bemessen, daß für ein Watt bei freier Ausspannung in der Luft etwa 6 bis 700 mm² und bei Aufwicklung auf Porzellanzylinder etwa 500 mm² Drahtoberfläche vorhanden sind. Bei Widerständen, die in Öl versenkt sind, ist die Oberfläche des Gehäuses reichlich (15 cm² für 1 Watt) zu bemessen, was z. B. durch Wellblechgehäuse erreicht wird; vgl. auch (320).

Bei der Konstruktion der Stufenschalter sind bei Luftkühlung brennbare Stoffe zu vermeiden. Die Grundplatte wird aus Marmor, Schiefer, Porzellan oder dgl. hergestellt. Die Abmessungen sind so zu wählen, daß keine schädliche Erwärmung im Betriebe eintreten kann. Man beanspruche die Berührungsflächen bei Blattfedern mit höchstens 0,8 A/mm², die von massiven federnden Klötzen mit höchstens 0,16 A/mm². Massive Kontakte verbrennen weniger leicht, weil sie die entstehende Wärme leichter aufnehmen und abführen. Etwa auftretende Lichtbogen müssen mit Sicherheit gelöscht werden, wozu vielfach magnetische Funkenlöschung angewendet wird. Blanke stromführende Teile sind abzudecken. Von dieser Regel kann nur bei niedrigen Spannungen und auch nur dann abgesehen werden, wenn sich aus dem Wegfall des Schutzes erhebliche Vorteile ergeben. Die Leitungen werden am besten mit Kabelschuhen angeschlossen; die Verschraubung der Anschlüsse ist besonders zu sichern, damit sie sich auch bei dauernder Erschütterung nicht lösen kann. Die Kontaktschrauben sind mit Rücksicht auf Strombelastung nach den Normalien des VDE über einheitliche Kontaktgrößen und Schrauben zu bemessen.

(566) Selbsttätige Regler[1]). — Man unterscheidet träge, Eilregler und Schnellregler. Die trägen und die Eilregler schalten entweder direkt

[1]) Vgl. Natalis, D. selbsttät. Regulierung d. elektr. Generatoren. Vieweg & Sohn. 1908. — Schwaiger, D. Regulierproblem in d. Elektrotechnik. Teubner, 1909. — Großmann, Tirrill-Regler, ETZ 1907, S. 1202 — Siedner, D. automat. Regulie-



oder indirekt, durch einen Steuerapparat — ein sog. Spannungsrelais — gesteuert, Widerstandsstufen im Erregerkreise ein und aus. Da aber wegen der großen Induktivität der Erregerwicklung die Stromstärke sich nur langsam ändert, so darf der Regulator nicht zu schnell arbeiten, weil er sonst überreguliert und dann dauernd starke Spannungsschwankungen hervorruft. Bei großen Maschinen braucht der Reguliervorgang vielleicht 20 s, eine Zeit, die viel zu lang ist, so daß die Spannungsschwankungen erheblich stören. Diesen Übelstand vermeiden die Schnellregler. Will man nämlich den Erregerstrom bei einer Zunahme der Belastung schnell auf die erforderliche größere Stärke bringen, so muß man der Erregerspannung auf kurze Zeit einen viel zu hohen Wert geben und sie in dem Augenblicke, wo der Erregerstrom den richtigen Wert erreicht hat, auf den richtigen Wert herabsetzen. Da das letztere sehr schwierig ist, kann man so verfahren, daß man der Erregerspannung in schnellem Wechsel eine Zeitlang einen viel zu hohen und wieder einen viel zu kleinen Wert erteilt. Der Erregerstrom stellt sich dann auf einen mittleren Wert ein, der um so höher liegt, je größer das Verhältnis der Zeit, in der die Erregerspannung einen zu großen Wert hat, zu der Zeit ist, in der sie einen zu kleinen Wert hat. Ein Hauptvertreter der Schnellregulatoren ist der Tirrill-Regler. Zum Durchlaufen der ganzen Kontaktbahn gebraucht der träge Regler etwa 45 s, der Eilregler 6 bis 15 s. Der Schnellregler stellt die richtige Spannung in etwa 1 s her.

(567) Träge und Eilregler. Der Steuerapparat ist eine mit Vorschaltwiderstand und nach Art der Spannungsmesser geschaltete Spule, deren beweglicher Eisenanker eine Kontaktzunge oder -scheibe schwebend zwischen zwei Kontaktschrauben hält. Bei zu geringer Spannung kommt die Zunge mit der einen, bei zu hoher mit der anderen Kontaktschraube in Berührung. Durch den Stromschluß wird entweder eine Klinke eines Schaltwerkes, das dauernd hin- und hergeht, eingerückt, oder ein kleiner Elektromotor in Gang gesetzt, und dadurch die Schleifkurbel auf der Kontaktbahn bewegt. Durch besondere Vorkehrungen wird dabei der Funke von den Kontakten des Steuerapparates vermieden oder auch bei starken Strömen ein Zwischenrelais eingeschaltet, das vom Steuerapparat in Tätigkeit gesetzt wird und seinerseits die Stromkreise für die stärkeren Ströme schließt. Bei dem Eilregler der Siemens-Schuckert-Werke (vgl. Grau, ETZ 1915, S. 63) wird für Gleichstromanlagen eine Hilfswicklung auf dem Steuerapparat angebracht, die dem Verstellmotor parallel geschaltet ist. Setzt sich dieser in Bewegung, so erhält die Hilfswicklung einen mit der Geschwindigkeit wachsenden Strom, der den Kontakt am Steuerapparat vorzeitig wieder zu öffnen sucht. In Wechselstromanlagen ist dem Verstellmotor ein Hilfsmotor parallel geschaltet, der mittels einer Wirbelstrombremse in demselben Sinne wie eben beschrieben auf den Steuerapparat einwirkt und ihn vorzeitig öffnet. Diese Vorrichtung wird so eingestellt, daß die Schleifkurbel ungefähr in der richtigen Stellung stehen bleibt.

Thieme (Dr. Paul Meyer A.-G.) vermeidet das Zwischenrelais, indem er den Steuerapparat in zwei kräftige Elektromagnete zerlegt, wobei durch eine sinnreiche Schaltung jeweils nur einer von ihnen in Tätigkeit treten kann.

(568) Der Tirrill-Regler wird von der AEG gebaut (Abb. 296). Ein Schüttelmagnet *JK*, der an die Erregerschienen *PN* angeschlossen ist, hält den um *G* drehbaren Hebel *H* dauernd in Schwingungen. Dadurch wird der Kontakt *CD* abwechselnd geschlossen und geöffnet. Dies Arbeiten wird durch ein Relais *Z* auf den stärker gebauten Kontakt *X* übertragen. Der Kontakt *X* schließt abwechselnd den ganzen im Erregerkreis der Erregermaschinen *E* liegenden Regulierwiderstand *R* kurz und öffnet ihn wieder. Das Verhältnis der Kurzschlußzeit zur Öffnungszeit wird durch die Lage des Kontaktes *D* bestimmt, der an dem mit dem regulierbaren

rungen der Wechselstromgeneratoren, ETZ 1909, S. 1116 — Thieme, Autom. Reguliervorrichtungen, ETZ 1908, S. 538 (Apparate von Dr. Paul Meyer A.-G.). — Grau, D. Schnellregler u. d. Eilregler d. S. Sch. W. ETZ 1915, S. 63.



Gewicht RG versehenen Hebel T sitzt und durch den von der Spannung der Wechselstrommaschine HD gespeisten Steuerapparat QR gehoben und gesenkt wird. Der Kern R muß bei richtiger Spannung der Wechselstrommaschine in jeder Höhenlage im Gleichgewicht sein, der Kern K taucht dagegen, indem er die Federn F stärker spannt, um so tiefer in seine Spule J ein, je höher die mittlere Erregerspannung ist. Der Steuerapparat QR besitzt noch eine von der Sekundärwicklung eines Stromtransformators Tr gespeiste regulierbare Hauptschlußwicklung W zur Erzielung einer Compoundwirkung. S ist eine Dämpfung, Y ein Kondensator zur Verminderung der Funken an X, die Umschalter U_1 und U_2 dienen dazu, etwa alle Tage einmal die Polarität an den Kontakten umzukehren, weil der positive Kontakt stärker als der negative abgenutzt wird. Der Kontakt X darf nicht einen

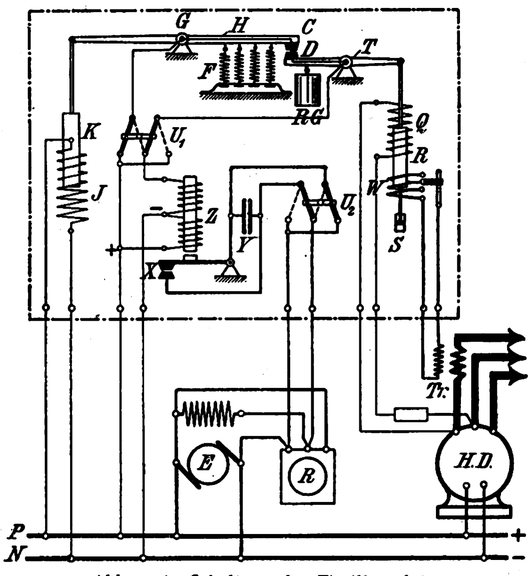


Abb. 296. Schaltung des Tirrillregulators.

im Erregerkreis der Wechselstrommaschine selbst liegenden Widerstand kurz schließen, weil die Schwingungen dann zu langsam vor sich gehen, und Spannungsschwankungen an der Wechselstrommaschine bemerkbar werden würden. Für größere Maschinen werden mehrere Kontakte X parallel geschaltet.

Die Schnellregler gestatten, mit größerem Spannungsabfall zu arbeiten, d. h. die Maschinen stärker auszunutzen. Außerdem ist ein großer Spannungsabfall bei Kurzschlüssen günstig, weil der Strom nicht so stark anwachsen kann, und endlich ist er für den Parallelbetrieb günstig. Selbstverständlich können diese Regler auch bei Gleichstrommaschinen verwendet werden.

(569) Schnellregler von Brown, Boveri u. Cie. Abb. 297. Der Apparat besitzt einen Steuerapparat — ein Drehspulenmeßgerät bei Gleichstrom, ein Ferrarismeßgerät bei Wechselstrom — der eine Achse verdreht. Diese Achse ist federnd mit einer in ihrer Verlängerung liegenden Steuerachse gekuppelt. Die Bewegungen dieser Steuerachse sind durch eine mittels Zahnradsektor und Zahnrad mit ihr verbundene Wirbelstrombremse C gedämpft. Sie trägt zwei (oder auch vier) paarweise im Durchmesser federnd gelagerte Pfannen, die den Spitzen von Kon-

taktsektoren *BB* als Widerlager dienen. Die Kontaktsektoren wälzen sich bei einer Drehung der Steuerachse auf je einer in einem Kreisbogen angeordneten Reihe von Kontakten ab. Hierzu brauchen die Pfannen nur einen kleinen Weg zurückzulegen. Die Steuerachse ist mit der Grundplatte so durch ein Federsystem verankert, daß das von diesem herrührende Drehmoment in jeder Lage der Achse dieselbe Größe hat. Bei einer Abweichung der Spannung von ihrem richtigen Werte stellt sich der Steuerapparat sofort in die neue Lage ein, die Steuerachse folgt infolge der Dämpfung mit einer gewissen Verzögerung, wobei sich die Kontaktsektoren auf den Kontaktbahnen abwälzen. Bei richtiger Spannung bleiben sie und die Steuerachse in jeder Lage stehen. Der Apparat stellt sich so schnell ein, daß ein Überregulieren nicht schadet, sondern geradezu vorgesehen ist.

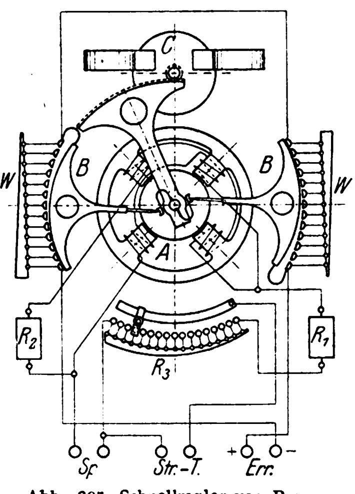


Abb. 297. Schnellregler von Brown, Boveri u. Cie.

(570) Bau der Anlasser. Die Anlasser werden als Metallwiderstände oder als Flüssigkeitswiderstände ausgeführt. Wie bei allen Regulierwiderständen sind die Schaltvorrichtungen und der Widerstand zu unterscheiden. Beide sind meistens in einem Apparat vereinigt, häufig aber auch getrennt, z. B. bei elektrischen Fahrzeugen. Die Schaltvorrichtungen sind häufig ähnlich wie die der Regulierwiderstände gebaut und weisen die mannigfaltigsten Formen auf. Sie bestehen zum Beispiel aus einer Anzahl Metallkontakte, die in einem Kreisbogen auf einer Steinplatte angeordnet sind und von der Schleifkurbel bestrichen werden. Mitunter werden die Kontakte nach Art eines zylindrischen oder flachen Kommutators zusammengebaut. Für größere Motoren müssen Schalter mit Metallkontakten sehr viele Stufen erhalten, wenn nicht Feuer an den Kontakten auftreten soll. Man hat daher zu Kohlenkontakten gegriffen, die entweder fest angeordnet und von einer Kupferrolle bestrichen werden oder federnd nebeneinander gestellt und der Reihe nach unter starkem Druck mit Kupferschienen in Berührung gebracht werden.

Mitunter, z. B. für Kranbetriebe, werden die Anlasser für mehrere Motoren durch einen einzigen in verschiedenen Richtungen umlegbaren Hebel bedient, so daß die Richtung der Umlegung zugleich andeutet, welche Bewegung die Last ausführen soll (Universalsteuerung).

Häufig werden die Anlasser mit selbsttätiger Auslösung für Maximalstrom oder Minimalspannung oder für beides gleichzeitig ausgestattet. Im ersteren Fall wird eine in den Ankerkreis geschaltete Spule angeordnet, die bei zu starkem Strom den Schalthebel freigibt, worauf ihn eine Feder in die Ausschaltestellung zurückführt; im letzteren Falle wird ein kleiner Elektromagnet in den Erregerkreis geschaltet, der den Hebel in der Betriebsstellung festhält, solange die Spannung nicht unter einen geringsten zulässigen Wert sinkt.

Die Anlasser sollen in der Regel so ausgeführt werden, daß alle stromführenden Teile, also auch die Kontaktbahn gegen Berührung durchaus abgedeckt sind; sie müssen in dieser Weise ausgeführt werden, sobald sie nicht für elektrische Betriebsräume bestimmt sind, und die Spannung gegen Erde 250 V überschreitet. An den Schleifringen von Induktionsmotoren ist die Spannung bei Stillstand am größten.

Um einen niedrigen Preis des Anlassers zu erzielen, beansprucht man das Widerstandsmaterial hinsichtlich Erwärmung hoch; Dauereinschaltung des Anlassers zur Regulierung der Drehzahl ist also nur möglich, wenn der Anlasser für diesen Zweck ganz besonders berechnet worden ist — Regulieranlasser. Motoren, die nur mit geringer Belastung anzulaufen haben, werden mit besonders stark beanspruchten, viel billigeren „Anlassern für halbe Last" versehen.

Bei Bemessung des Widerstandsmaterials ist zu unterscheiden, ob der Anlasser für Anlauf unter voller Last oder für Anlauf bei verminderter Last oder für Leerlauf bestimmt ist, ferner, in welcher Zeit der Motor auf die volle Geschwindigkeit kommt. Große Motoren laufen im allgemeinen langsamer an als kleine. Bei Transmissionsantrieben u. dgl. rechnet man auf 20 bis 30 Sekunden, bei Zentrifugen muß man mit 5 Minuten und mehr, bei Schwungradumformern mit noch längeren Zeiten rechnen. Man unterscheidet ferner Anlasser für Dauerbetrieb der Motoren und Anlasser für aussetzenden Betrieb. Erstere können für langsame Abkühlung gebaut werden und erhalten bei großen Leistungen eine große Wärmekapazität, letztere sind für schnelle Abkühlung zu berechnen, wobei ein Betriebsplan zugrunde gelegt werden muß (302).

(571) Bei den Induktionsmotoren werden die drei Zweige des Anlaßwiderstandes zweckmäßig in Stern geschaltet (Abb. 256). Dreieckschaltung ist bei Draht-Anlassern zu vermeiden, weil die Schaltbahn dabei weniger einfach ist. In der Regel wird die Kontaktbahn so ausgebildet, daß sie drei Reihen von Kontaktknöpfen enthält, entsprechend den drei Zweigen des Sekundärankers, der fast immer, auch bei Zweiphasenmotoren, dreiphasig gewickelt wird. Die Kontaktbürsten sitzen dann unisoliert an einer drehbaren Metallscheibe, die den äußeren Nullpunkt der Stromkreise bildet.

Zur Verbindung zwischen den Bürsten und dem Anlasser dienen starke Leitungen, weil der Spannungsverlust mit Rücksicht auf Wirkungsgrad und Schlüpfung auf ein Minimum herabgedrückt werden muß. Die Stromstärke in diesen Leitungen kann nur bestimmt werden, wenn die Anlaßspannung, d. h. die Spannung an den Bürsten bei Stillstand bekannt ist; diese muß daher für jeden Motor angegeben werden. Ist sie P_2, so ist $I_2 = N_2/P_2\sqrt{3}$, wenn N_2 die Leistung des Sekundärankers bei Stillstand ist.

Mitunter läßt man die Widerstände mit umlaufen und durch einen selbsttätigen Kurzschließer kurz schließen, sobald der Motor eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat. In diesem Falle hat der Widerstand nur eine Stufe.

(572) Walzenschalter werden in erster Linie bei elektrischen Straßenbahnen angewendet, ferner aber auch häufig in allen den Fällen, wo der Motor fortwährend aus- und eingeschaltet wird. In diesem Falle trägt eine vertikal oder horizontal angeordnete, aus Isoliermaterial (getränktem Holz) hergestellte oder mit Isolation umkleidete Walze eine Anzahl nebeneinander angeordneter, bei höheren Spannungen durch Scheidewände voneinander getrennter Ringe oder Ringstücke, auf denen kräftige abklappbare Bürsten schleifen. Mittels dieser Walzen, deren einzelne Stellungen durch eine federnde, in Vertiefungen einer Rastenscheibe eingedrückte Rolle fühlbar gemacht und gesichert werden, lassen sich nicht nur die einzelnen Stufen des Widerstandes bequem abschalten, sondern es können auch noch anderweitige Schaltungen, z. B. Bremsschaltungen, hergestellt werden. Die Walzenschalter sind in der Regel mit magnetischen Gebläsen ausgestattet, um Stehfeuer, d. h. Stehenbleiben des Lichtbogens an den Kontakten, zu vermeiden.

(573) Flüssigkeitsanlasser bilden eine besondere Gattung der Anlasser; sie bestehen in der Regel aus schmalen gußeisernen, mit Sodalösung gefüllten Gefäßen, in die passend zugeschnittene Eisenbleche eingetaucht werden. Wenn das Blech völlig eingetaucht ist, wird meistens durch einen Metallschalter der Flüssigkeitsanlasser kurz geschlossen. Man kann auch die Bleche ein für allemal in die Gefäße eingesenkt lassen und den Widerstand durch Heben der Flüssigkeit ver-



ringern. Für große Leistungen benutzt die AEG eine Pumpe, die die erwärmte Flüssigkeit durch ein Kühlgefäß laufen läßt. Die Flüssigkeitsanlasser zeichnen sich besonders bei größeren Motoren durch Billigkeit aus, doch gestatten sie nicht, den Motor so stoßfrei anzulassen wie die Metallanlasser; der metallische Kurzschluß erzeugt nämlich in der Regel einen stärkeren Stoß. Wegen der Gefahr der Knallgasentwicklung müssen sie gut gelüftet sein.

Für reinen Motorenbetrieb und für Fahrzeugbetrieb, bei denen die Rücksichtnahme auf Beleuchtungseinrichtungen zurücktritt, haben sie aber trotzdem große Bedeutung gewonnen, wobei die leichte Bedienbarkeit aus der Entfernung (Heben der Flüssigkeit durch Druckluft) und die Möglichkeit beliebiger Abstufung als besonders wertvoll erscheinen.

Statt der Flüssigkeit wird auch **Graphit** in Flockenform verwendet, in das Metallbleche hineingedrückt werden. Hierbei zeigt sich als Nebenerscheinung eine gewisse Fritterwirkung.

(574) Selbsttätige Anlasser. Für Aufzüge und Motoren, die aus der Ferne bedient werden sollen, werden selbsttätige Anlasser verwendet, die nach Schluß des Stromkreises den Ankerwiderstand allmählich ausschalten. Dies kann beispielsweise durch einen Fliehkraftregler geschehen, der bei wachsender Geschwindigkeit mehr und mehr Widerstand abschaltet. Damit der Motor sicher anläuft, darf die gesamte Größe des durch ihn abzuschaltenden Widerstandes nur so groß bemessen werden, daß die volle Ankerstromstärke auftritt. Bei anderen Konstruktionen gleiten die Bürsten, durch ihre Schwere oder eine Feder getrieben und in ihrer Geschwindigkeit durch eine Luftpumpe, eine Ölbremse oder ein Echappement geregelt, über die Kontakte; wieder bei anderen Konstruktionen wird die Klemmenspannung des Ankers benutzt, um mit Hilfe von Relais die Bewegung der Bürsten zu beeinflussen.

Nach einem Vorschlage von Kallmann (ETZ 1907, S. 495 ff.) baut die AEG Anlasser mit wenig Stufen, die aus Eisendrahtwiderständen in einer Wasserstoffatmosphäre bestehen, sog. Variatoren. Diese haben, wenn sie bis zu schwacher Rotglut belastet sind, die Eigenschaft, daß sich ihr Widerstand bei geringen Änderungen der Stromstärke sehr stark ändert. Beim Einschalten sinkt die anfänglich hohe Stromstärke daher schnell auf den Wert, bei dem der Motor anlaufen soll. Sobald dann mit wachsender Geschwindigkeit die Stromstärke zu sinken beginnt, nimmt der Widerstand des Variators stark ab. Man braucht daher zum Anlassen von kleineren Motoren nur ein bis zwei Variatoren, die nacheinander kurzgeschlossen werden.

(575) Das **Widerstandsmaterial** (Nickelin, Rheotan, Kruppin, Chromnickel, Eisen, Gußeisen u. dgl.) besteht in der Regel aus Draht, Band oder Blech und wird in einfachen gut ventilierten Gehäusen (Massenfabrikation) untergebracht, und zwar entweder in Spiralen oder gewellten Bändern frei ausgespannt (empfehlenswert, wenn gute Kühlung wegen häufiger Benutzung erwünscht ist) oder in geeigneter Weise zwischen Asbest, Glimmer oder dgl. eingepackt (empfehlenswert, wenn hohe Wärmekapazität erwünscht ist). Vielfach wird das Widerstandsmaterial auch unter Öl angeordnet. Überall, wo die Anlasser Erschütterungen ausgesetzt sind, muß dafür gesorgt werden, daß nicht durch Schwingungen Kurzschlüsse der einzelnen Teile miteinander auftreten können. Drahtspiralen sind nur bei starkem Draht und geringer Länge zulässig, dünne Drähte sind auf Porzellanzylinder oder dgl. zu wickeln. Festgepackte Widerstände für schwache Ströme werden aus Blechstreifen hergestellt, die abwechselnd von beiden Längsseiten aus eingeschnitten sind, so daß eine Art Mäanderband entsteht. Ähnlich sind auch die Widerstandselemente aus Gußeisen gestaltet. Schniewindtsche Widerstandsbänder s. (60).

(576) Materialbeanspruchung. Wenn das Widerstandsblech oder der Draht frei in der Luft ausgespannt ist, so daß die kühle Luft stets zutreten und die erwärmte frei abziehen kann, so kann man

$$I^2 R = a \cdot S \varDelta \vartheta \text{ Watt}$$

setzen, worin a eine Konstante, S die gesamte Oberfläche in cm², $\varDelta \vartheta$ die Temperaturdifferenz zwischen dem Material und der Luft in ° Cels. ist. Daraus folgt

$$\frac{S}{I^2 R} = \frac{1}{a \cdot \varDelta \vartheta} = c \frac{\text{cm}^2}{\text{Watt}}.$$

c ist die für 1 Watt zur Verfügung stehende Oberfläche in cm². Hieraus folgt für Länge l und Breite b von Blechen bei gegebener Stromstärke

$$b = I \sqrt{\frac{\varrho c}{2d}} \text{ cm} \quad \text{und} \quad l = \frac{bd}{d} R \text{ cm},$$

wenn d die Blechstärke in cm ist; ferner für die Drahtstärke δ

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{4 \varrho c I^2}{\pi^2}} \text{ cm}, \quad \text{woraus} \quad I = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\delta^3}{\varrho c}} \text{ Amp},$$

wenn ϱ der spezifische Widerstand in $\frac{\Omega \text{ cm}^2}{\text{cm}}$ oder Ωcm ist. Die Größe a steigt mit der Temperaturdifferenz $\varDelta \vartheta$, weil der Luftzug dann stärker wird. Unterhalb 500° kann a gleich 1/150 W/cm² ° Cels. gesetzt werden, sodaß $c = 150/\varDelta \vartheta$ cm²/W.

Bei niedrigen Temperaturen — 100 bis 200° C — wird die Wärme hauptsächlich durch die Berührung mit der Luft und nur zum geringen Teile durch Strahlung abgegeben. Bei Widerständen, die eine größere Zahl nebeneinander angeordneter Widerstandskörper enthalten, kommt letztere fast gar nicht in Betracht. Da dann auch die Lüftung geringer ist, so ist zu empfehlen, c etwas größer zu nehmen, als obiger Formel entspricht.

(577) Beispiele ausgeführter Maschinen und Transformatoren.

Übersicht:

I. Stromerzeuger, Abb. 298 bis 304.
II. Motoren, a) Gleichstrommotoren, Abb. 305 bis 307.
b) Asynchronmotoren, Abb. 308 bis 311.
c) Wechselstrom-Kommutatormotoren, Abb. 312 bis 315.
III. Motorgeneratoren, Abb. 316 bis 319.
IV. Umformer, Abb. 320 bis 323.
V. Transformatoren, Abb. 324 bis 328.
VI. Quecksilber-Gleichrichter, Abb. 329.

Siemens-Schuckertwerke, Abb. 298, 309, 312, 315, 317, 320, 321, 326.
Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Abb. 302, 311, 313, 316, 328.
Brown, Boveri & Co., Abb. 304, 314, 318, 329.
Bergmann-Elektrizitätswerke, Abb. 299, 307, 325.
Sachsenwerk, Abb. 310, 322.
MF. Örlikon, Abb. 308, 324.
DEW. Garbe, Lahmeyer u. Co., Abb. 300.
MF. Eßlingen, Abb. 301.
EW. Heidenau, Abb. 305.
F. el. M. Dr. M. Levy, Abb. 306.
Pöge-El. A.-G., Abb. 319.
Ziehl-Abbegg El.-Ges., Abb. 323.
Koch & Sterzel, Abb. 327.

Das bei einigen Maschinen angegebene Trägheitsmoment entspricht der Formel $J = \int r^2 dm$ und ist gleich $^1/_4\, GD^2$.

I. Stromerzeuger.

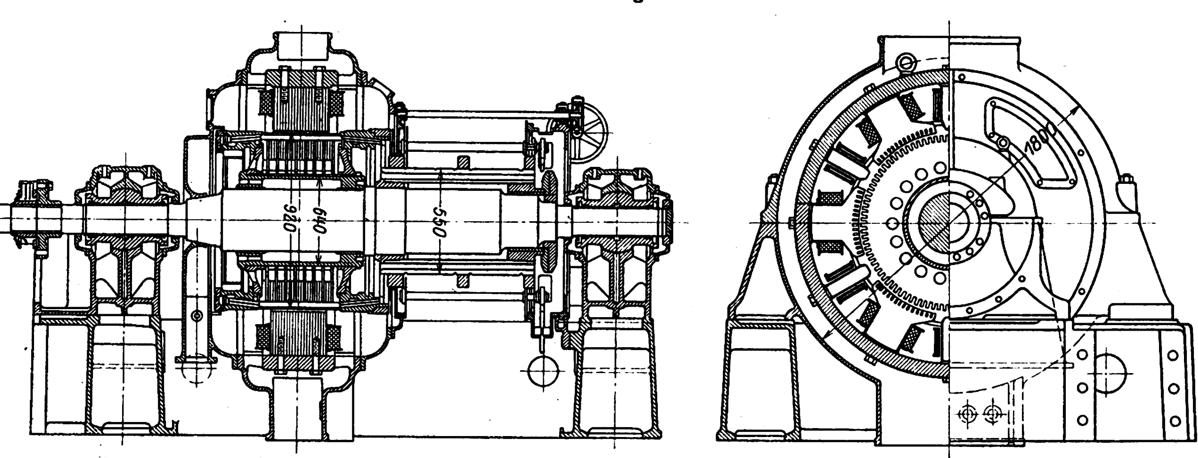


Abb. 298. **Gleichstrom-Turbogenerator der Siemens-Schuckertwerke, Berlin.** Modell TG. 370.

700 kW, 580 V. 1210 A, 1500 U/min, $\eta = 0{,}928$, Maßstab 1:40.

A n k e r: Kern d 920/640 mm, l 330 mm mit 6 Luftschlitzen von 10 mm, 93 offene Nuten mit Keilverschluß, hoch 40 mm, breit 13,6 mm, Schleifenwicklung mit Äquipotentialverb., 186 Windungen.

K o m m u t a t o r: d 550 mm, l 2 × 250 mm, 186 Stege. 16 Bürsten parallel, Graphit 21 × 22 mm.

F e l d m a g n e t e: Joch Stahlguß. Pole aus Blech von 1 mm; in jedem Pol 14 geschlossene Kompensationsnuten (35 mm hoch, 11 mm breit), Nutenteilung $\pi D/126$, 7 Windungen auf 1 Pol, Pole 2fach ||, Kupfer 27 × 8 mm. Erregung 2,1 kW. 6 Hauptpole in Reihe, je 2000 Windungen aus Draht 1,8 mm bl., 2,1 mm isol., Widerst. 16,5 Ω; 6 Wendepole in Reihe, je $3^1/_2$ Wind. aus Kupferblech 130 × 4 mm bl., Widerst. 0,0001 Ω.

L u f t s p a l t: Hauptpole 10 mm, Wendepole 18 mm. Wendepol- und Kompensationswicklung mit Parallelwiderstand zum Einstellen der besten Kommutierung. — Polbog./Tlg. 0,7.

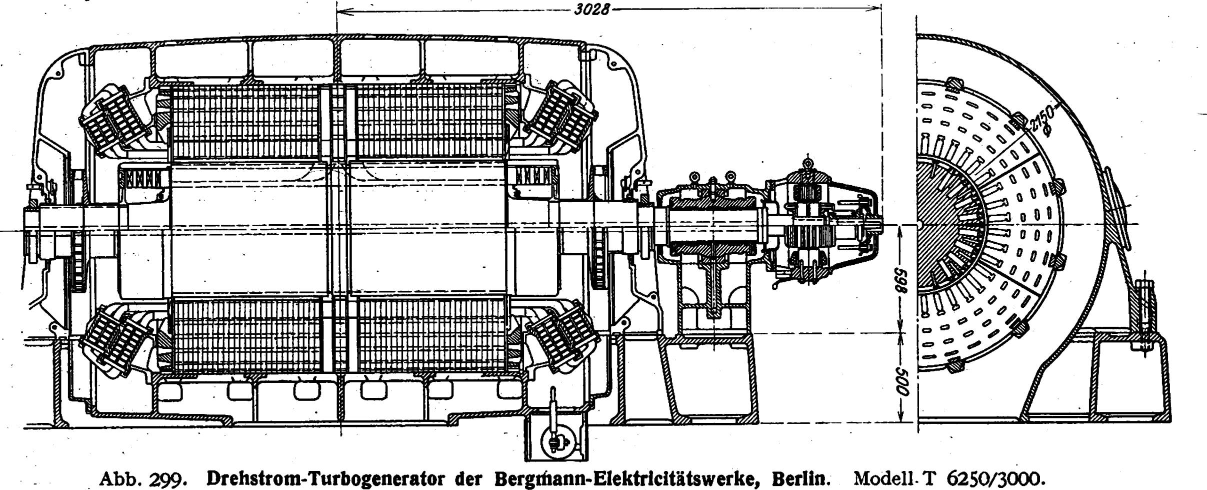


Abb. 299. **Drehstrom-Turbogenerator der Bergmann-Elektricitätswerke, Berlin.** Modell T 6250/3000.
6250 kVA, 5500 V, Drehzahl 3000. Maßstab 1 : 42.
Anker: d_a 1600, d_i 784, l 1860 mm. 36 halboffene Nuten (80 mm hoch, 29 mm breit).
Feldmagnet: 10 offene Nuten auf 1 Pol, Widerstand 0,47 Ω/Pol.
Luftspalt: 19,5 mm.
Gewicht: Feldmagnet 7,5 t, Anker 29,4 t. — $J = 0{,}55$ tm².

Abb. 300. **Gleichstromgenerator der DEW. Garbe, Lahmeyer & Co., A.-G., Aachen.**
500 kW, 450 V, 1110 A, 120 U/min, $\eta = 0{,}93$. Maßstab 1 : 50.
Anker: Kern d 2250 mm, l 260 (—12) mm, d_i 1780 mm; 324 off. Nuten, (11 × 42) mm² zu 8 Drähten von je 2 × 4,2 mm ⦶ bl.; Schleifenwicklung, Bandagen Bronzedraht.
Kommutator: d 1400 mm, l 310 mm, 648 Stege, 12 × 4 Bürsten.
Feldmagnete: 12 Hauptpole, Blech je (30 × 25) cm², je 750 N.-, 30 H.-Wdg. von je 3,5 mm ⦶, bzw. 65 mm² bl.; 12 Wendepole, Blech je 148 H.-Wdg. von je 65 mm² bl.; N.-Wdg. in Reihe, H.-Wdg. parallel; Luftspalt: Hp. u. Wp. je 5 mm; Polbog./Teilg. 0,75.
Gewichte: Feldmagnete 9,8 t. — Anker 7,2 t, $J = 7$ tm².

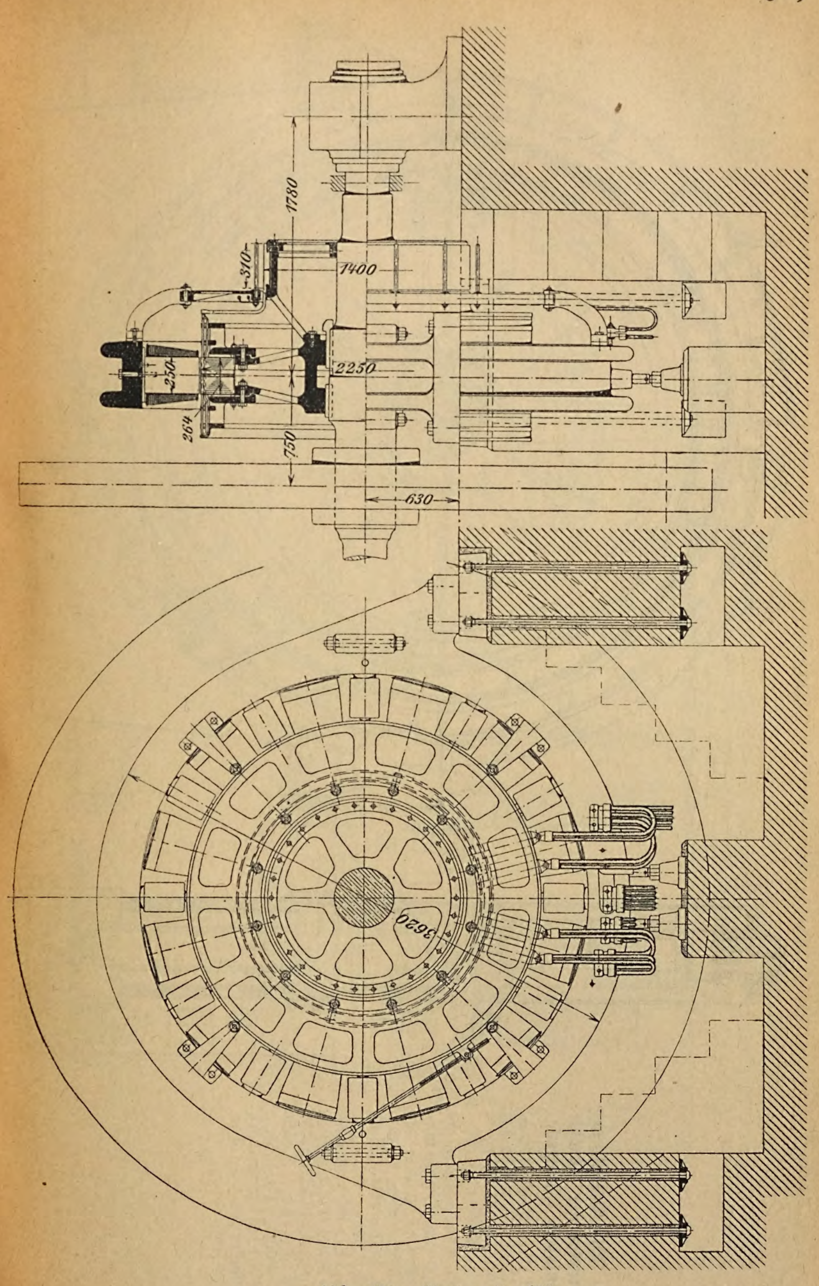


Abb.. 300. (Text s. S. 368.)

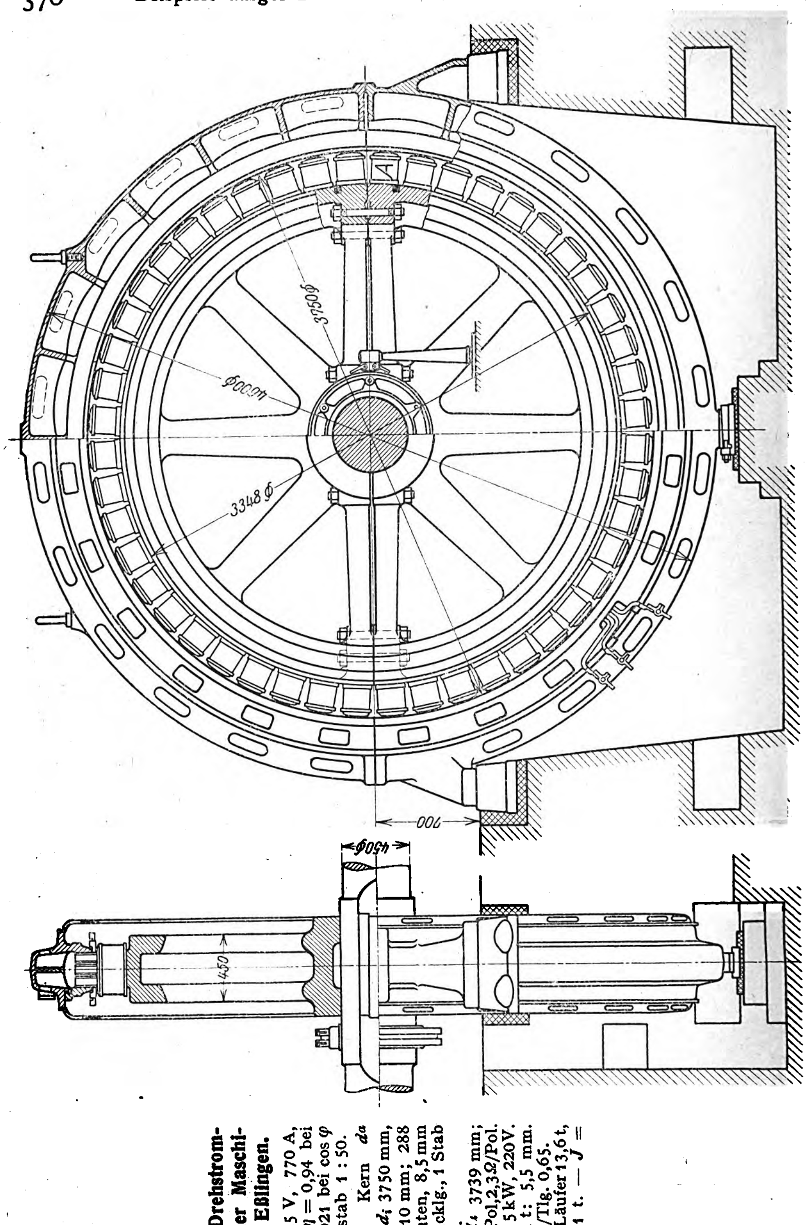


Abb. 301. Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Eßlingen.

700 kVA, 525 V, 770 A, 125 U/min, $\eta = 0{,}94$ bei $\cos\varphi = 1$, 0,921 bei $\cos\varphi = 0{,}8$; Maßstab 1 : 50.

Ständer: Kern d_a 4000 mm, d_i 3750 mm, l 200 + 2 × 10 mm; 288 halboff. Nuten, 8,5 mm Φ, Stabwicklg., 1 Stab auf d. Nut.

Läufer: d_a 3739 mm; 110 Wind./Pol, 2,3 Ω/Pol. Erregung 15 kW, 220 V.

Luftspalt: 5,5 mm. — Polbog./Tlg. 0,65.

Gewichte: Läufer 13,6 t, Ständer 9,1 t. — J = 27,2 tm².

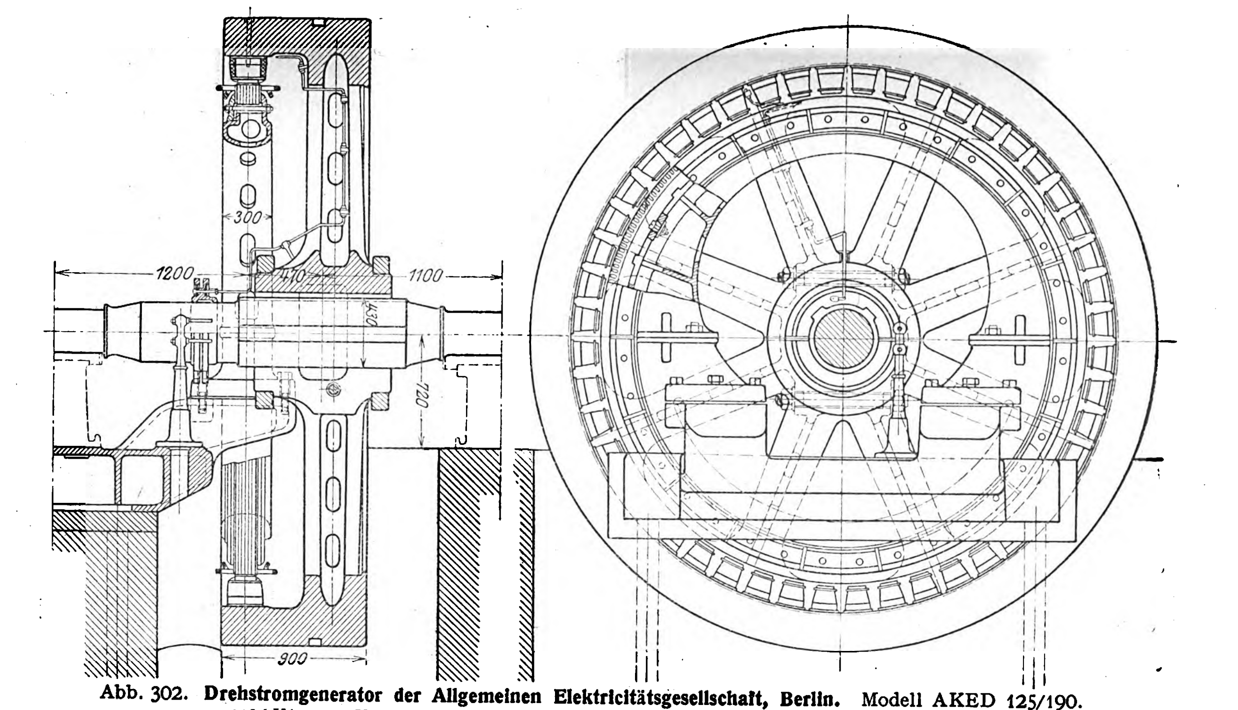


Abb. 302. Drehstromgenerator der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft, Berlin. Modell AKED 125/190.

228 kVA, 2300 V, 57,2 A, 150 U/min, 60 Per/s, $\eta = 0{,}915$ bei $\cos\varphi = 1$; Maßstab 1 : 47.

A n k e r: d_a 3000 mm, d_i 2750 mm, l 135 mm; 288 geschlitzte Nuten (40 mm hoch, 15 mm breit), abwechselnd 7 u. 8 Wind./Nut, Sternschaltung.

F e l d m a g n e t: Ring d_a 3850 mm, d_i 3370 mm, Pole Stahlguß (150 × 98 mm), Joch Gußeisen. Hauptpole 80 Wind/Pol aus 4,6 × 6,4 mm blank, 5,3 × 7,1 mm isol., 0,0258 Ω/Pol. Erregung 7,7 kW bei 110 V.

L u f t s p a l t: 5 mm. — Polbog./Tlg. 0,71.

G e w i c h t e: Magnetring 550 kg Kupfer, Anker 171 kg Kupfer. — $J = 75$ tm². Antrieb durch Körtingschen Zwillings-Gasmotor, 4-Takt, 2 Zylinder, 1 Explosion/Umdr. Maschine ohne Dämpfer.

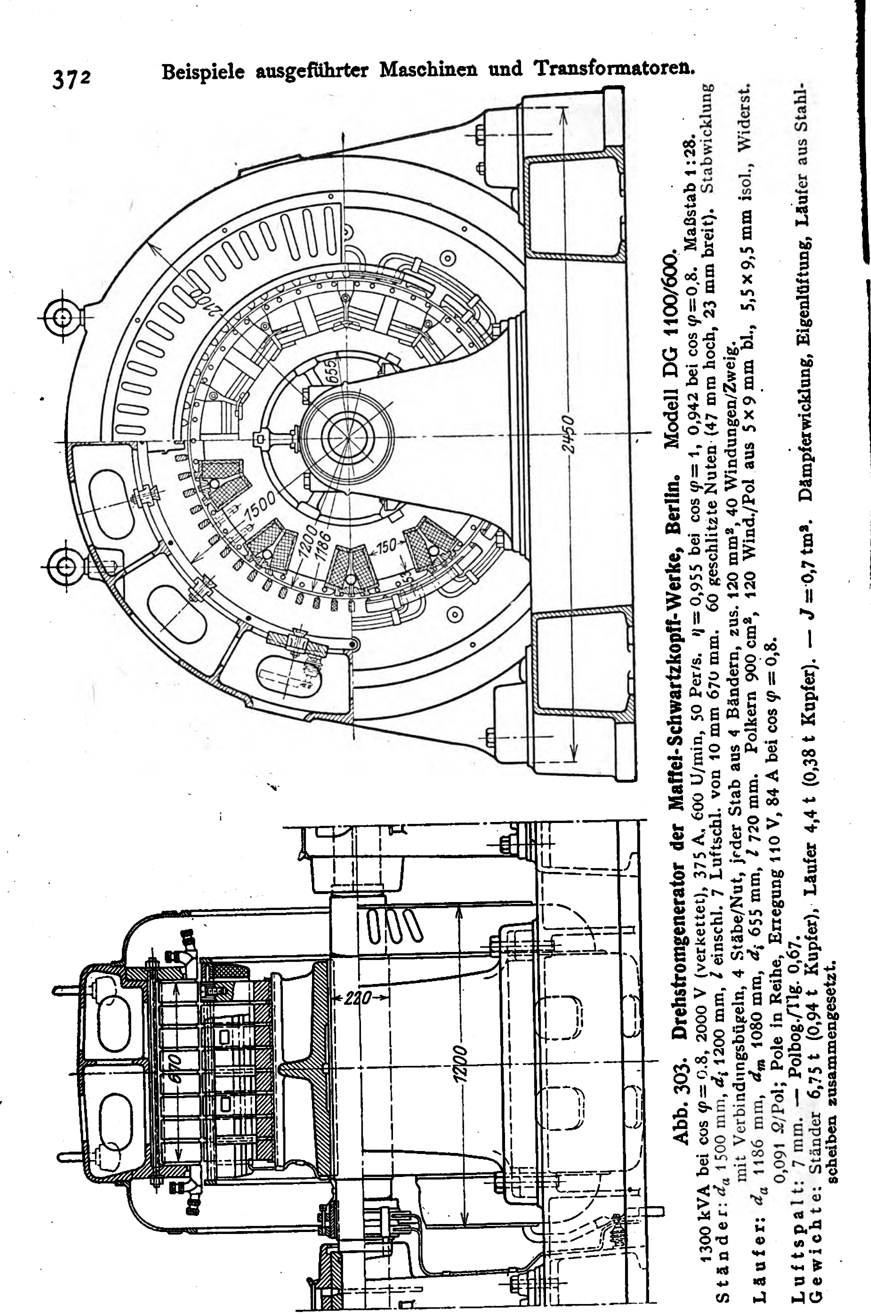


Abb. 303. Drehstromgenerator der Maffei-Schwartzkopff-Werke, Berlin. Modell DG 1100/600.

1300 kVA bei $\cos\varphi = 0{,}8$, 2000 V (verkettet), 375 A, 600 U/min, 50 Per/s. $\eta = 0{,}955$ bei $\cos\varphi = 1$, 0,942 bei $\cos\varphi = 0{,}8$. Maßstab 1:28.

Ständer: d_a 1500 mm, d_i 1200 mm, l einschl. 7 Luftschl. von 10 mm 670 mm. 60 geschlitzte Nuten (47 mm hoch, 23 mm breit). Stabwicklung mit Verbindungsbügeln, 4 Stäbe/Nut, jeder Stab aus 4 Bändern, zus. 120 mm², 40 Windungen/Zweig.

Läufer: d_a 1186 mm, d_m 1080 mm, d_i 655 mm, l 720 mm. Polkern 900 cm², 120 Wind./Pol aus 5×9 mm bl., 5,5×9,5 mm isol., Widerst. 0,091 Ω/Pol; Pole in Reihe, Erregung 110 V, 84 A bei $\cos\varphi = 0{,}8$.

Luftspalt: 7 mm. — Polbog./Tlg. 0,67.

Gewichte: Ständer 6,75 t (0,94 t Kupfer), Läufer 4,4 t (0,38 t Kupfer). — $J = 0{,}7$ tm². Dämpferwicklung, Eigenlüftung, Läufer aus Stahlscheiben zusammengesetzt.

Text zu Abb. 304, S. 273.

5700 kVA, 3200 V, 1030 A, $\cos\varphi = 0{,}85$, 128 U/min; $\eta = 0{,}95$. Maßstab 1:80.

Anker: Kern d_a 6480 mm, d_i 6000 mm, l 480 mm; 315 off. Nuten (65 mm hoch, 26 mm breit), Stabwicklung, 2 Wind./Nut.

Feldmagnet: d_a 5200 mm, d_i 4500 mm, l 255 mm. 38 Wind./Pol aus 5,3×45 mm, alle in Reihe, 0,16 Ω/Pol. Erregung 55 kW.

Luftspalt: 11 mm. — Polbog./Tlg. 0,63.

Gewichte: Feldmagnet 34 t, Anker 35 t. — $J = 165$ tm².

Abb. 304. Stehender Drehstromerzeuger von Brown, Boveri & Co. A.-G.
Modell B 6000/42.

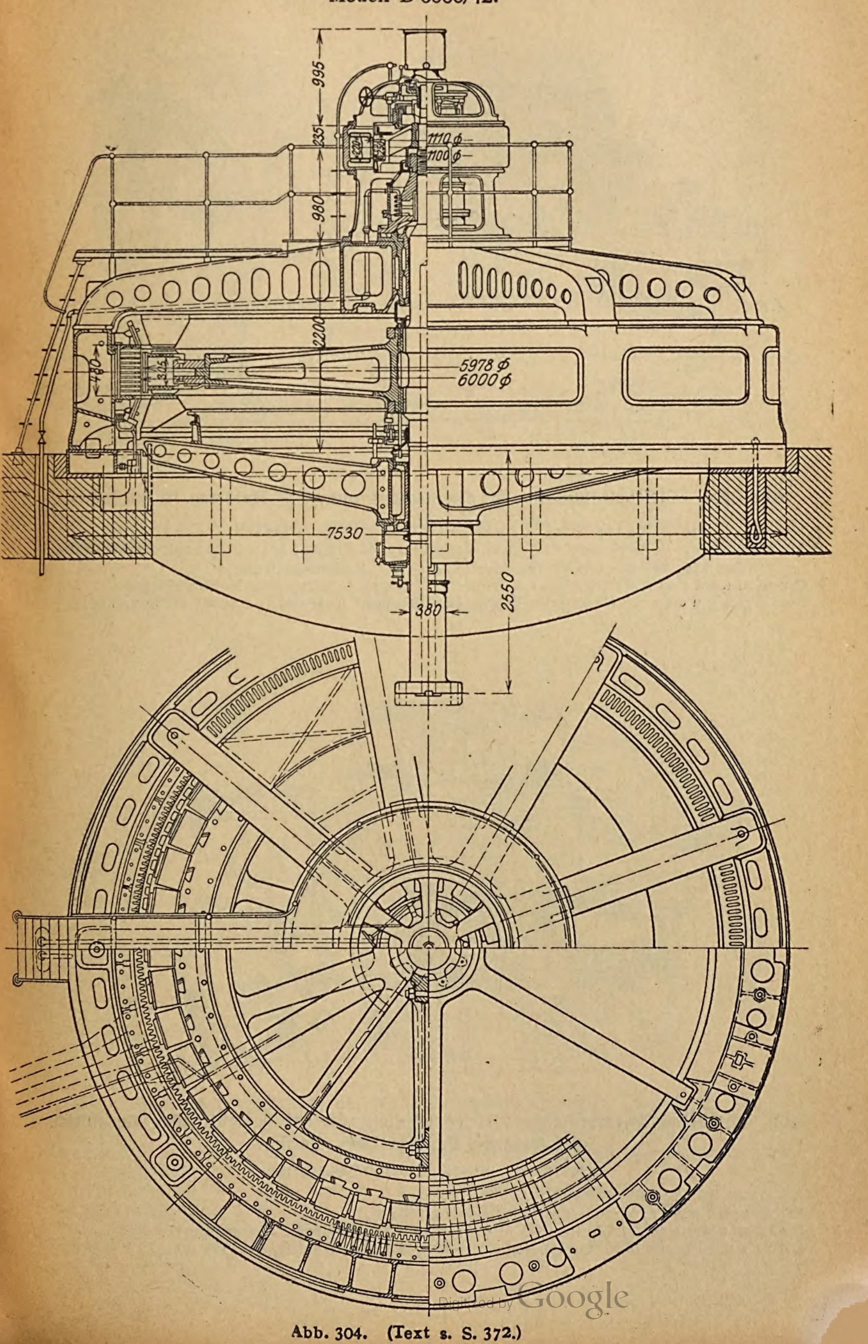


Abb. 304. (Text s. S. 372.)

II. Motoren. a) Gleichstrommotoren.

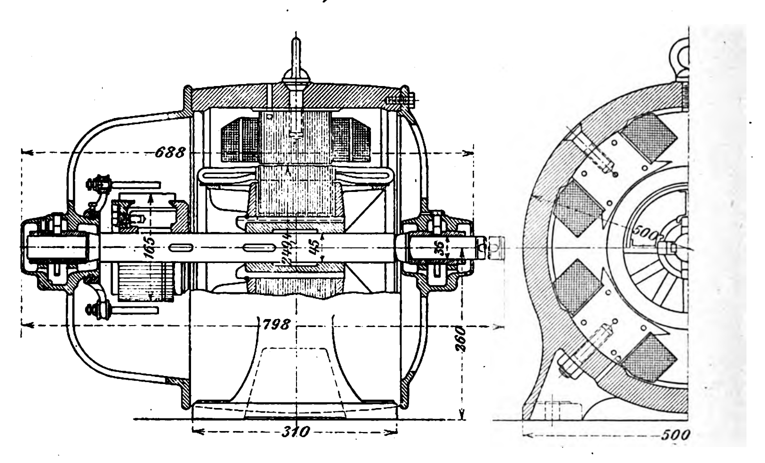


Abb. 305. Gleichstrommotor der Elektromotorenwerke Heidenau G. m. b. H.

7,36 kW, 110 bis 500 V, 980 U/min, $\eta = 0{,}98$. Maßstab 1 : 12,5.

Anker: Kern d 294,4 mm, l 112 mm, d_i 95 mm; off. Nuten; bei 110 V Schleifenwicklung, bei 220, 440 u. 500 V Wellenwicklung mit Reihenschaltung.
Kommutator: d 165 mm, l 85 mm, 135 Stege, 4 Stifte mit Kohlenbürsten.
Feldmagnete: 4 Hauptpole Blech (11 × 10) cm²; Luftspalt 2,3 mm: Polbog./Tlg. 0,7.

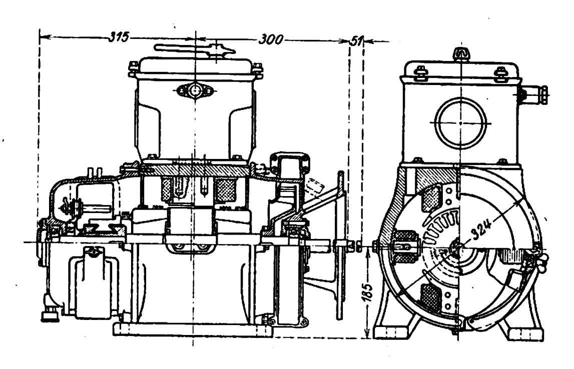


Abb. 306. Schwallwasserdichter Gleichstrommotor der Fabrik elektrischer Maschinen und Apparate Dr. Max Levy, Berlin.

2,1/3,4 kW, 110/170 V, 3200/3800 U/min.

Anker: d_a 150 mm, l 95 mm.
Kommutator: d 100 mm, l 52 mm, 72 Stege.
Feldmagnete: 2 Hauptpole 75 × 95 mm², 2 Wendepole 25 × 85 mm².
Luftspalt: an den Hauptpolen 2, 3 mm, an den Wendepolen 3,0 mm.



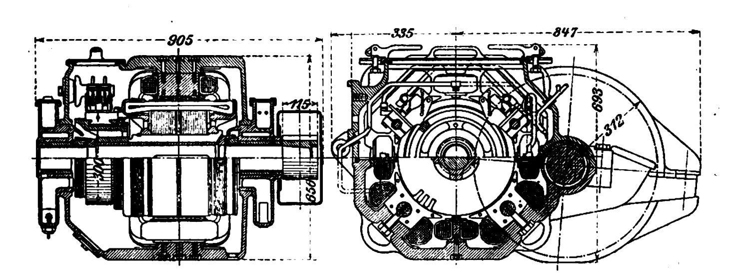


Abb. 307. Gleichstrommotor der Bergmann-Elektricitäts-Werke A.-G., Berlin.

32,4 kW, 650 V, 58 A, 575 U/min, $\eta = 0,86$. Maßstab 1 : 25.

Anker: Kern d 380 mm, l 185 (—10) mm, 41 off. Nuten zu 24 Leitern, Wellenwicklung in 2 Stromkreisen.
Kommutator: d 300 mm, l 85 mm, 163 Stege, 2 Stifte mit Kohlenbürsten.
Feldmagnete: 4 Hauptpole, halb Stahlguß, halb mit Polschuh aus Blech, je (11,5 × 18,5) cm²; 4 Wendepole, Eisen, je (2 × 13) cm²; Luftspalt: Hp. 3.5 mm, Wp. 3,5 mm; Polbog./Teilg. 0,71.

IIb. Asynchronmotoren.

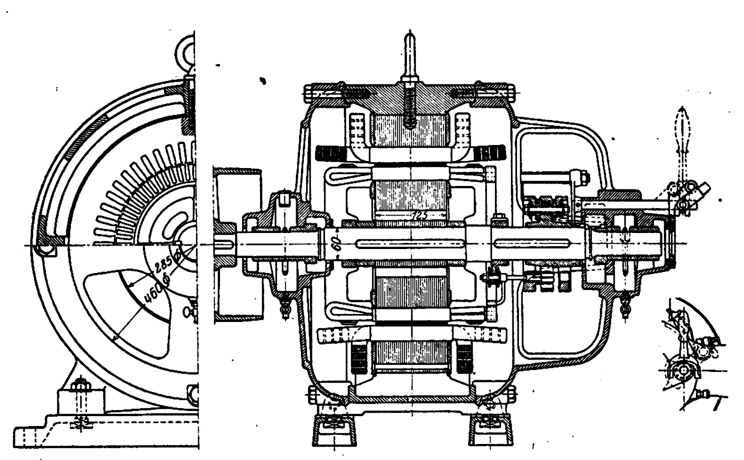


Abb. 308. Asynchronmotor der Maschinenfabrik Örlikon. Modell Gr 24.

22 kW, 500 V, 33 A, 1450 U/min, $\eta = 0,88$. Maßstab 1 : 13,5.

Läufer: d_a 285 mm, d_m 229 mm, d_i 60 mm, l 125 mm; 60 halboff. Nuten (28 mm hoch, 7 mm breit), Wellenwicklung, 3 × 40 Windungen.
Schleifringe: d 175 mm, breit 22 mm. 3 Bürsten 40 × 18 mm.
Ständer: d_a 460 mm, d_i 286,4. 48 halboff. Nuten (30 mm hoch, 10,5 mm br.). Sternschaltung. 14 Drähte (3,4/3,8) in der Nut.
Luftspalt: 0,7 mm.

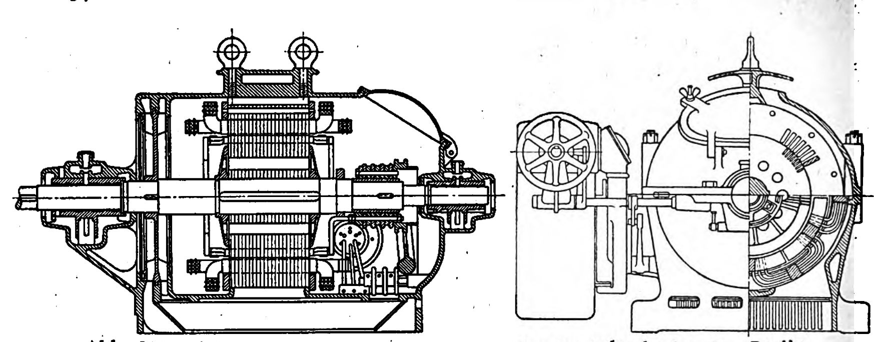


Abb. 309. Gekapselter Asynchronmotor der Siemens-Schuckertwerke, Berlin, mit angebautem Anlasser und Umlaufkühlung.

Länge zwischen den Lagermitten 1200 mm, an der Grundplatte 925 mm. Achsenhöhe 450 mm. Maßstab 1 : 25.

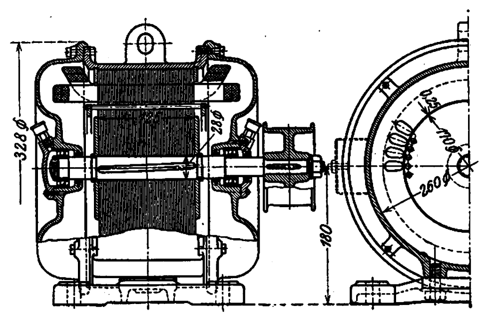


Abb. 310. Drehstrommotor des Sachsenwerks, Niedersedlitz bei Dresden. Webstuhlmotor.

1,1 kW, 380 V, 2,35 A, 1000 U/min, $\eta = 0{,}86$ bei $\cos\varphi = 0{,}83$. Maßstab 1 : 10.
Ständer: Kern d_a 260 mm, d_i 170,6 mm, l 125 mm. 36 halboff. Nuten (25 mm hoch, 10/12 mm breit). Dreiphasenwicklung, 56 Leit./Nut.
Läufer: Kern d_a 170 mm, d_i 28 mm, l 125 mm; 43 halboff. Nuten (5,8 mm ⌀). Käfigwicklung.
Luftspalt: 0,25 mm. Gewicht des Motors 82 kg.
Kugellager und legiertes Eisenblech.

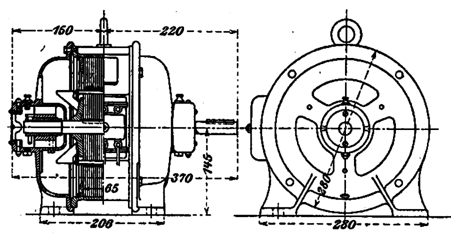


Abb. 311. Drehstrom-Asynchronmotor der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin.

0,75 kW, 220 V, 2,85 A, 1420 U/min, 50 Per/s, $\eta = 0{,}83$, $\cos\varphi = 0{,}83$. Maßstab 1 : 12,5.
Ständer: Kern d_i 125 mm, l 65 mm, d_a 230 mm.
Läufer: Kern d_i 21 mm, Luftspalt 0,3 mm; Käfiganker.
Gewichte: Ständer 34 kg, Läufer 8 kg.

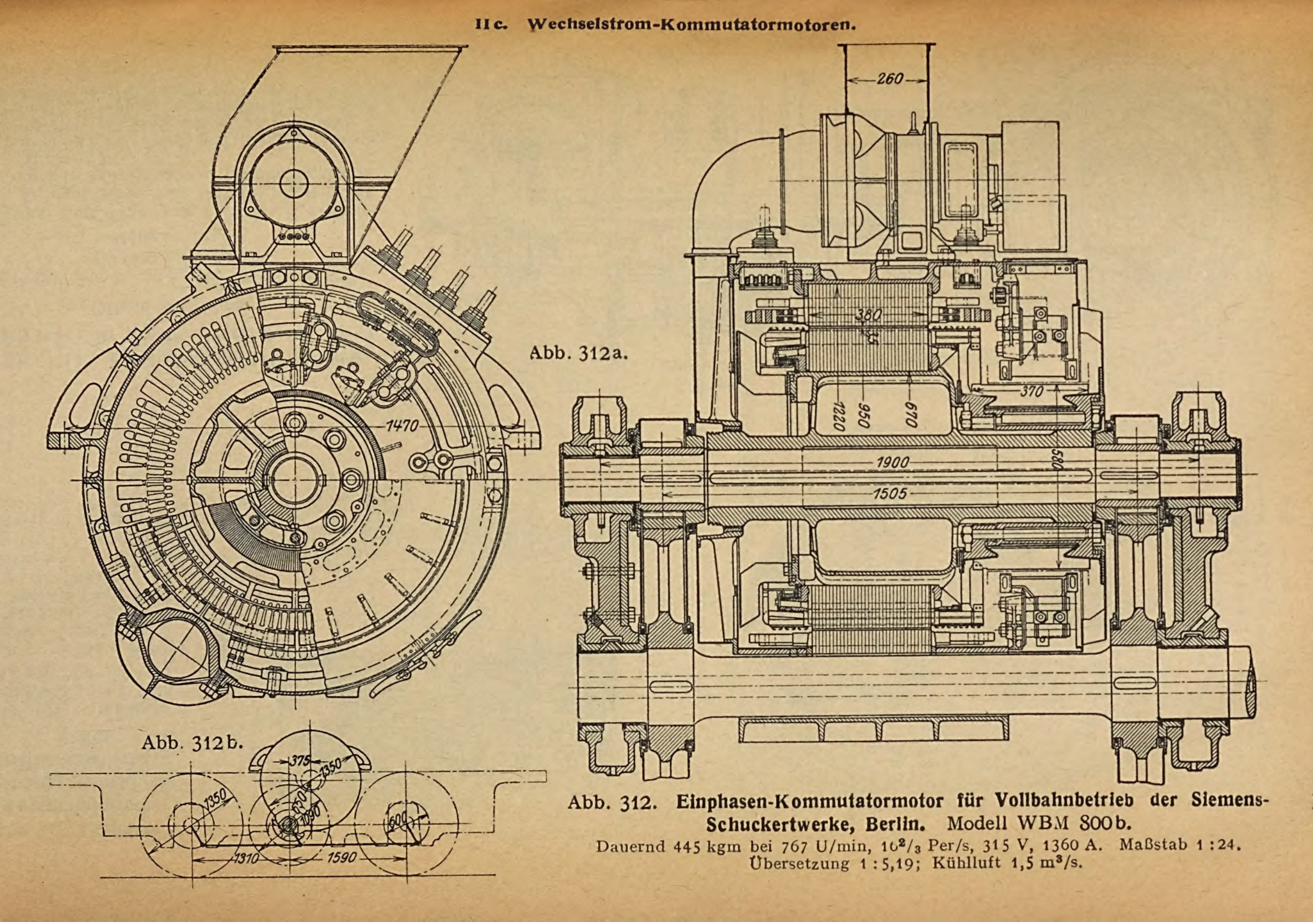


Abb. 312. Einphasen-Kommutatormotor für Vollbahnbetrieb der Siemens-Schuckertwerke, Berlin. Modell WBM 800b.
Dauernd 445 kgm bei 767 U/min, $16^2/_3$ Per/s, 315 V, 1360 A. Maßstab 1 : 24. Übersetzung 1 : 5,19; Kühlluft 1,5 m^3/s.

Abb. 313. Einphasen-Kommutatormotor der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft, Berlin.

258 kW Stundenleistung, 900 V, 500 U/min, 25 Per/s. Maßstab 1:25.

Anker: Kern d 800 mm, l 330 mm, d_i 420 mm; 70 h. off. Nuten 8,5 × 55 mm², zu 12 Drähten.

Kommutator: d 630 mm, l 270 mm, 6 × 4 + 2 × 3 Kohlenbürsten.

Ständer: 6-polig, Kern d_a 1110 mm, 12 + 36 h. off. Nuten 27 × 45 mm² zu je 16 u. 18 Leitern.

Schaltung Winter-Eichberg.

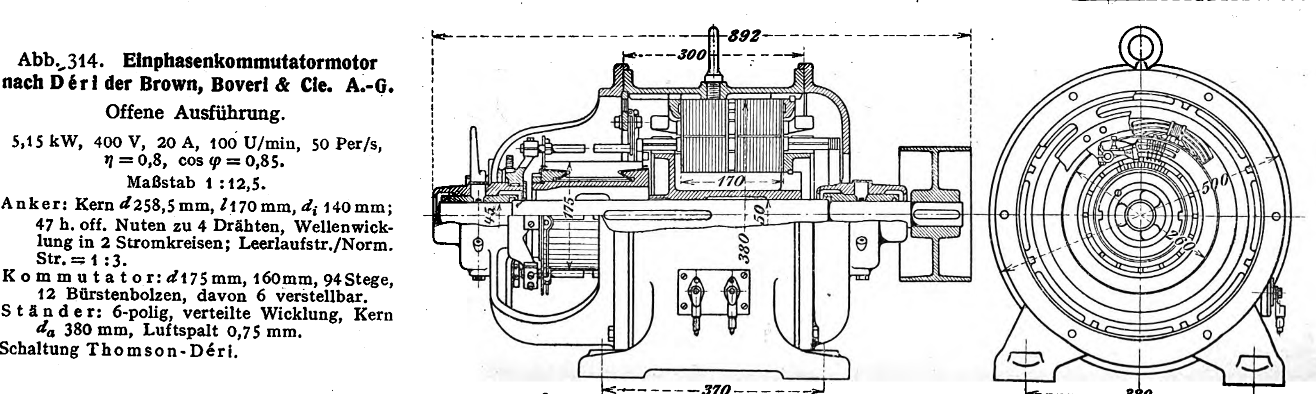


Abb. 314. Einphasenkommutatormotor nach Déri der Brown, Boveri & Cie. A.-G.

Offene Ausführung.

5,15 kW, 400 V, 20 A, 100 U/min, 50 Per/s, $\eta = 0{,}8$, $\cos\varphi = 0{,}85$.

Maßstab 1:12,5.

Anker: Kern d 258,5 mm, l 170 mm, d_i 140 mm; 47 h. off. Nuten zu 4 Drähten, Wellenwicklung in 2 Stromkreisen; Leerlaufstr./Norm. Str. = 1:3.

Kommutator: d 175 mm, 160 mm, 94 Stege, 12 Bürstenbolzen, davon 6 verstellbar.

Ständer: 6-polig, verteilte Wicklung, Kern d_a 380 mm, Luftspalt 0,75 mm.

Schaltung Thomson-Déri.

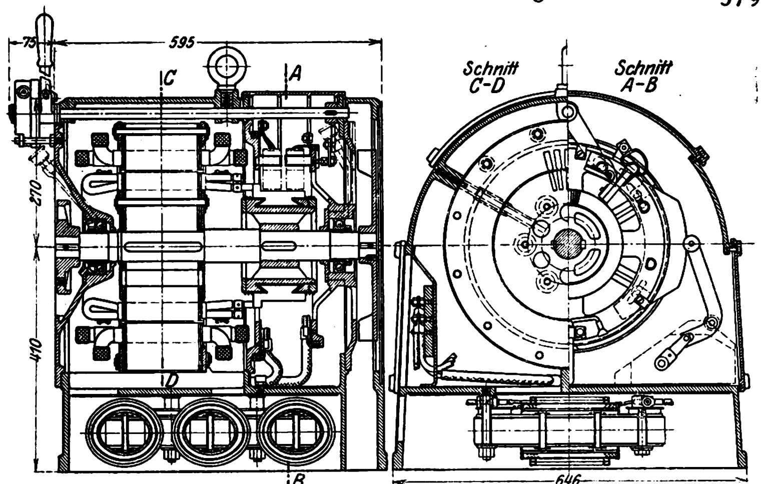


Abb. 315. Drehstrom-Kommutatormotor der Siemens-Schuckertwerke, Berlin.
Reihenschaltung mit Transformator; vgl. Abb. 270, S. 340.

III. Motorgeneratoren.

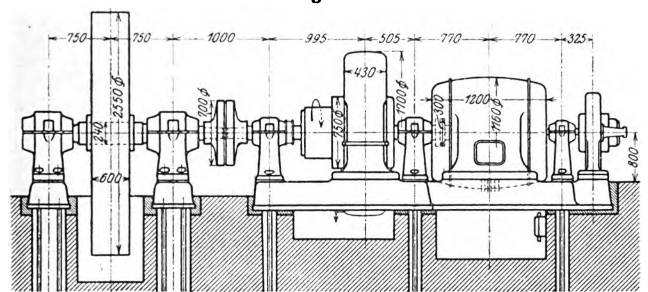


Abb. 316. Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin. Maßstab 1 : 80.

I. D r e h s t r o m m o t o r, Modell FD 750/225. 147 kW, 6000 V, 16,5 A, 730 U/min, 25 Per/s. $\eta = 0{,}925$. — L ä u f e r: Kern d_a 627,5 mm, d_i 420 mm, l 460 mm. 120 halboff. Nuten (hoch 21 mm, br. 10,5 mm). Trommelwicklung, 40 Wind./Zweig. — S t ä n d e r: Kern d_a 900 mm, d_i 630 mm, l 460 mm. 72 halboff. Nuten (hoch 48 mm, br. 20 mm). — L u f t s p a l t: 1,25 mm. — G e w i c h t e: Ständer 2,1 t (0,211 t Kupfer), Läufer 1,26 t (0,142 t Kupfer). — $J = 0{,}05$ tm².

II. G l e i c h s t r o m e r z e u g e r, Modell HG 3003. 233 kW, 350 V, 665 A, 730/620 U/min, $\eta = 0{,}915$ bei 620 U/min. — A n k e r: Kern d_a 750 mm, d_i 450 mm, l 300 mm. 135 off. Nuten (hoch 38 mm, br. 7,4 mm). 270 Wind., Schleifenwicklung und Äquipotentialverbind. — Kommutator: d 535 mm, l 300 mm, 270 Stege, 6 × 6 Kohlenbürsten 13 × 32 mm. — F e l d m a g n e t: Joch d_a 1700 mm, d_i 1420 mm Gußeisen, Pole Blech. Erregung 3,9 kW. — H a u p t p o l e mit Hilfswicklung für indirekte Kompoundierung. Haupt- und Hilfswicklung sind den Drehzahlen des Motors entsprechend unterteilt. 140 + 240 Wind. 2,4/2,7 mm ⌀ und 185 + 188 Wind. 1,45/1,7 mm ⌀, kalt 10,1 und 27,1 Ω (8 Sp. i. Reihe). — W e n d e p o l e mit 9 Wind. 200 mm², 0,004 Ω (kalt). Fremderregung 220 V. — L u f t s p a l t 6/8 mm. Polbog./Teilg. 0,63. — G e w i c h t e: Feldmagnet 230 kg, Anker 114 kg. — $J = 0{,}09$ tm². — 100 % Überlastbarkeit.

III. E r r e g e r, Modell MPM 150. 15 kW, 220 V, 68,3 A, 730/620 U/min, $\eta = 0{,}885$. — A n k e r: Kern d_a 410 mm, d_i 260 mm, l 135 mm. 73 off. Nuten (hoch 20 mm, br. 9,6 mm). Reihenwicklung, 290 Wind. — Kommutator d 300 mm, l 60 mm, 145 Stege, 8 Kohlenbürsten 13 × 32 mm. — F e l d m a g n e t: Joch d_a 850 mm, d_i 750 mm, Dicke 150 mm, Joch und Pole Stahlguß. Nebenschlußwicklg. 920 Wind. aus 1,45 mm Draht, 4,4 Ω; Kompound 8,5 Wind. 2 × 20 mm², 0,00175 Ω/Spule. E r r e g u n g: 0,82 kW. — L u f t s p a l t 3,5 mm. — Polbog./Teilg. 0,755. — G e w i c h t e: Kupfer im Feldmagnet 62,5 kg, im Anker 17,1 kg. — $J = 0{,}005$ tm².

IV. S c h w u n g r a d: Gewicht 10 t, $J = 11$ tm².

Abb. 317. Motorgenerator der Siemens-Schuckertwerke, Berlin, mit schwerem Schwungrad nach Ilgner.
Steueraggregat 2 GM 480 + R 404 p 600, Maßstab 1 : 45.

Gleichstrommaschine: 570 V, dauernd 1475 A [340 kW], beim Walzen (Stichwert) 3815 A [2170 kW], beim Ausschalten 4750 A [2700 kW], 470 bis 600 U/min. Ankereisen d_a 1280 mm, l 300 mm; Kommutator d 900 mm, l 2 × 235 mm.
Drehstrommotor: 600/880 kW, 1900/2050 V, 50 Per/s, 594 U/min, I_l 300 A, $\eta = 0{,}95$, $\cos\varphi = 0{,}9$.
Ständereisen d_a 1500 mm, d_i 900 mm, l 520 mm; 150 halboff. Nuten (16 × 52/55).
Läufer 120 halboff. Nuten (16 × 32/40). Sternschaltung. Schleifringspannung 1068 V, Schleifringstrom 560 A.
Schwungrad: $J = 60$ tm².

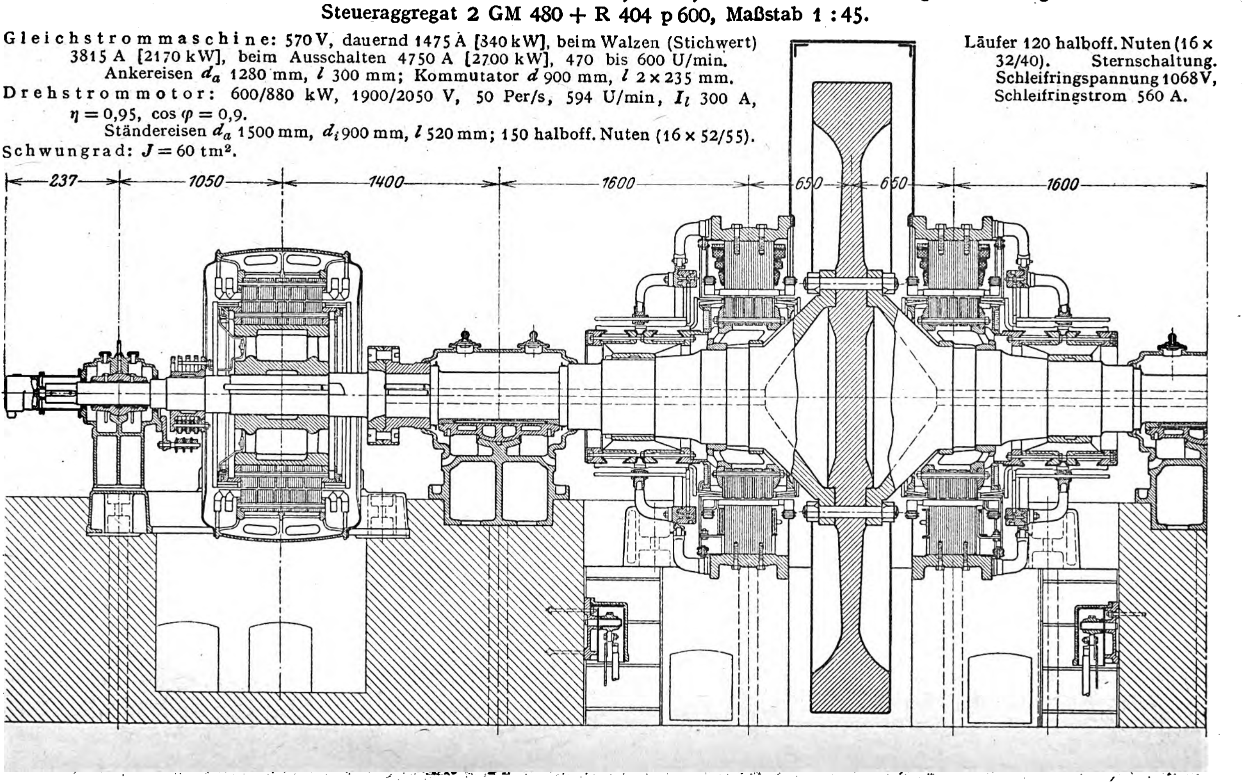


Abb. 318. Synchroner Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator von Brown, Boveri & Co. A.-G.
Maßstab 3 : 200.

I. Dreiphasen-Synchronmotor, Modell D. — 1850 kW, 3100 V, 370 A, 375 U/min, $\eta = 0{,}945$. — Anker: Kern d_a 2450 mm, d_i 2000 mm, l 520 mm. 144 halboff. Nuten (hoch 65 mm, br. 22 mm). Spulenwicklung. — Magnetring: d_a 1980 mm; 16 Pole, Erregung 17 kW bei 500 V. — Luftspalt: 10 mm. — Polbog./Teilg. 0,65.

II. Gleichstromerzeuger, Modell O, 1800/10-polig. 1750 kW, 500/525 V, 3330 A, 375 U/min, $\eta = 0{,}94$. — Anker: Kern d_a 1800 mm, d_i 1420 mm, l 500 mm. 300 off. Nuten (hoch 43 mm, br. 9 mm). — Schleifenwicklung mit Äquipotentialverbind. an jed. zweiten Stege. — Kommutator d 1160 mm, l 655 mm, 300 Stege. — 130 Kohlenbürsten 25 × 30 mm². — Magnetring: d_a 1800 mm, d_i 1316 mm, Dicke 480 mm, volles Eisen. — Hauptpole: Nebenschluß, alle Spulen in Reihe, 700 Wind./Pol, Draht 2,8 mm ⌀, 37,6 Ω/Pol. Kompound $^1/_2$ Wind. 30 × 30 mm² 0,000136 Ω. — Wendepole 8 Wind. 20 × 35 mm², 0,000445 Ω. Erregung 60 kW. — Luftspalt: 8 mm. — Polbog./Teilg. 0,69. — Gewichte: Feldmagnet 11 t, Anker 10 t. — $J = 5{,}0$ tm² (für die drehbaren Teile zusammen.)

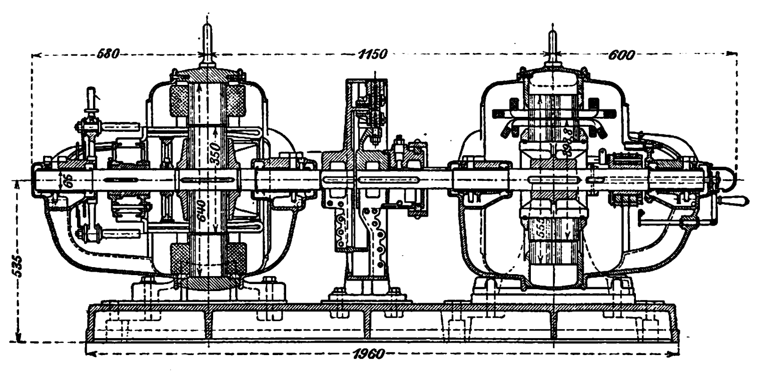


Abb. 319. Motorgenerator der Pöge-Elektr. Akt.-Ges., Chemnitz. (Text s. S. 382.)

Abb. 319. Motor-Generator der Pöge-Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft, Chemnitz. Maßstab 1 : 25.

I. Drehstrom-Asynchronmotor: 22 kW, 120 V, 133 A, 960 U/min, 50 Per/s, $\cos\varphi = 0{,}89$.
Ständer: Kern d 400 mm, l 150 (—10) mm; d_a 555 mm; 54 h. off. Nuten zu 7 Drähten.
Läufer: 6-polig, Kern d_i 250 mm, Schleifringe Bronze, mit Kurzschl.-Vorr.; Luftspalt 0,6 mm.

II. Gleichstromgenerator: 21,5 kW, 230 V, 94 A.
Anker: Kern d 350 mm, l 125 mm; d_i 70 mm; 53 h. off. Nuten zu je 16 Drähten, Schleifenwicklung.
Kommutator: d 275 mm, l 80 mm, 105 Stege, 8 Bürsten.
Feldmagnete: 4 Hauptpole, Blech; Luftspalt 4 mm.

Maschinen durch Reibungskuppelung verbunden.

IV. Umformer.

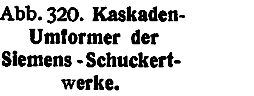


Abb. 320. Kaskaden-Umformer der Siemens-Schuckert-werke. Maßstab 1:62.

I. Gleichstromseite, Modell DUGK 483/35. 1000 kW, 2 × 220/2 × 265 V, 2270/1880 A, 375 U/min, $\eta = 0{,}955$.
Anker: Kern d_a 1280 mm, d_i 800 mm, l 350 mm. 128 off. Nuten (hoch 50 mm, br. 12,6 mm). Schleifenwicklung mit 12 Äquipotentialverb. 384 Wind. — Kommutator d 800 mm, l 2 × 280 mm, 384 Stege. — 192 Graphitbürsten 15 × 18 mm².
Magnetring: d_a 2530 mm, d_i 2115 mm, Dicke 207,5 mm, 1300 cm² Gußeisen. — Pole aus Blech 270 × 400 mm². 8 Hauptpole, 955 Wind., 3,3/3,7 mm ⌀, 3 Ω/Pol. — 8 Wendepole 5 Wind., 160 × 6 mm², 0,000085 Ω/Pol. Erregung 8 kW.
Luftspalt: 6,5 mm. — Polbog./Teilg. 0,7.
Gewichte: Feldmagnet 15 t, Anker 12,5 t. — $J = 0{,}3$ tm² (beide Anker zusammen).

II. Drehstromseite, Modell R 482/35. 1000 kW, 5000 V, 127 A, 375 U/min, $\eta = 0{,}955$.
Läufer: Kern d_a 1597 mm, d_i 1250 mm. 96 halboff. Nuten (hoch 40 mm, br. 32 mm), 12-Phasen, Sternschaltung.
Ständer: Kern d_a 2050 mm, d_i 1603 mm, l 390 mm. 120 geschloss. Nuten (hoch 48 mm, br. 27 mm), 3-Phasen-Spulenwicklung, Sternschaltung.
Luftspalt: 3 mm.
Trägheitsmoment des Doppelankers $J = 3$ tm².

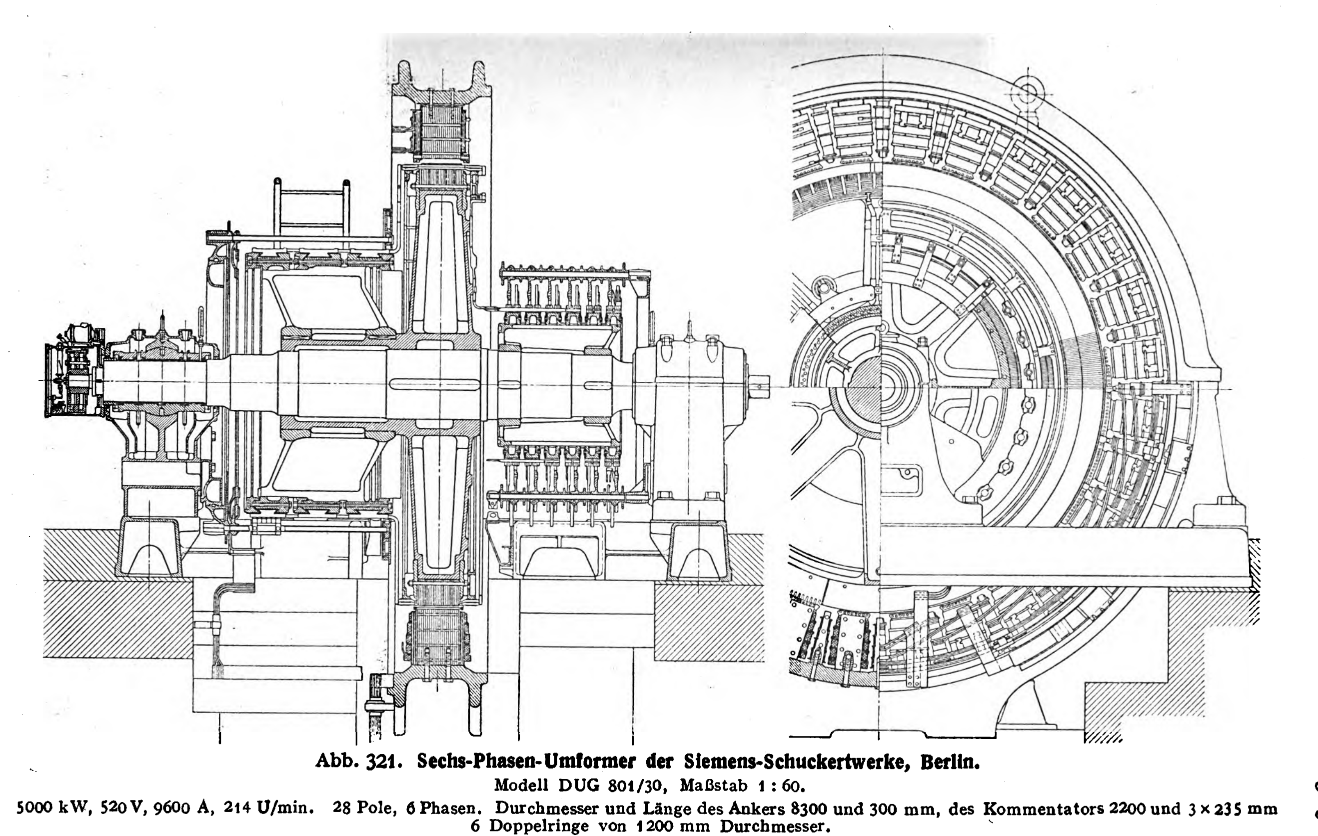


Abb. 321. Sechs-Phasen-Umformer der Siemens-Schuckertwerke, Berlin.
Modell DUG 801/30, Maßstab 1 : 60.
5000 kW, 520 V, 9600 A, 214 U/min. 28 Pole, 6 Phasen. Durchmesser und Länge des Ankers 8300 und 300 mm, des Kommentators 2200 und 3 × 235 mm
6 Doppelringe von 1200 mm Durchmesser.

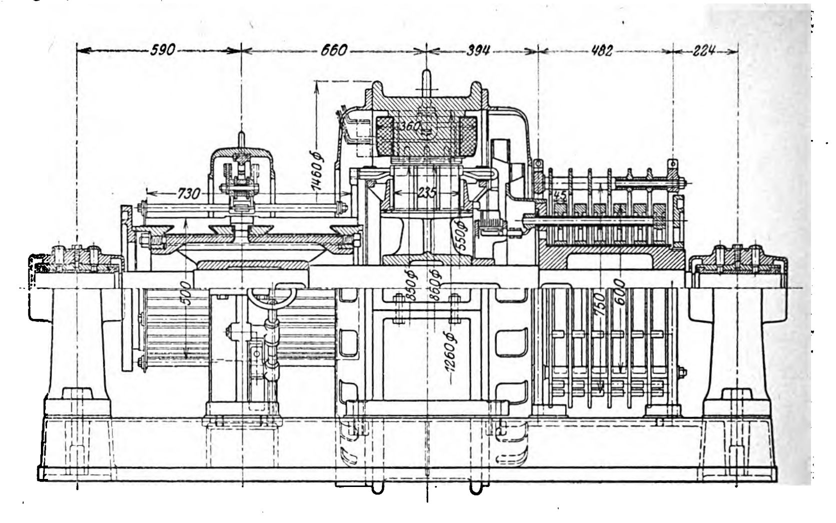


Abb. 322. Sechs-Phasen-Umformer des Sachsenwerks, Niedersedlitz bei Dresden. Umformung von Drehstrom in Gleichstrom.

Drehstrom: 6×45 V, 50 Per/s . . . . . . } 750 U/min. Maßstab 1 : 27.
Gleichstrom: 400 kW, 130 V, 3080 A, $\eta = 0{,}95$ }

Anker: Kern d_a 850 mm, d_i 550 mm, l 235 — 2 × 10 mm. 144 off. Nuten (hoch 35 mm, br. 8 mm). Schleifenwicklung in 8 Stromkreisen, 288 Stäbe. Kommutator 144 Stege, 14 × 8 Kohlenbürsten 25 × 30 mm².

Feldmagnete: 8 Hauptpole aus Stahl (230 × 155 mm²), 350 Wind./Pol, Aluminium, 4,3 Ω/Pol. 8 Wendepole aus Eisen (35 × 200 mm²), 9 Wind., Kupfer 200 mm², 0,006 Ω/Pol. Erregung 2,5 kW.

Luftspalt: 5 mm HP, 10 mm WP; Polbog./Teilg. 0,65.

Gewicht der Maschine 6,0 t.

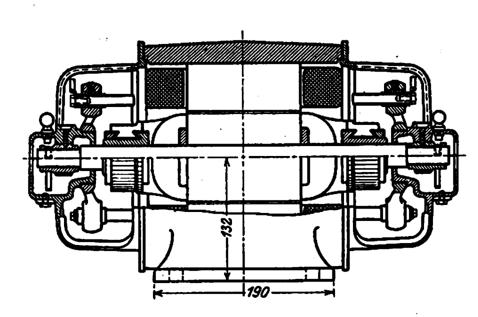


Abb. 323. Gleichstrom-Gleichstrom-(Spar-)Umformer der Ziehl-Abegg-Elektrizitätsgesellschaft m. b. H., Berlin. Modell GU 15.

600 W, 220/60 V, 3,6/12 A, 2000 U/min, $\eta = 0{,}75$.

Anker: Kern d_a 95 mm, d_i 25 mm, l 120 mm. 24 halboff. Nuten (hoch 13 mm, br. 5 mm). Schleifenwicklung, 10 Windgn. Kommutator ⌀ 55 mm, l 30 mm, 48 Stege.

Feldmagnet: d_a 245 mm, d_i 200 mm, Dicke 22,5 mm, volles Eisen. Wicklung 2800 Windgn. aus Draht 0,35 mm ⌀, Wdst. 440 Ω/Pol.

Luftspalt: 0,75 mm. — Polbog./Teilg. 0,60. — Gewicht 52 kg.

V. Transformatoren.

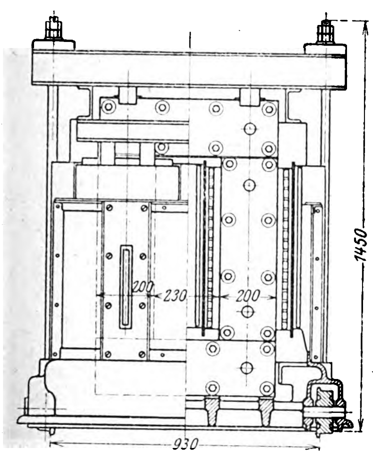
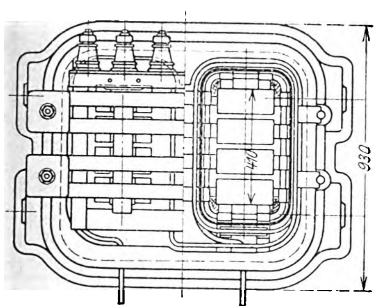


Abb. 324. Einphasen-Transformator der Maschinenfabrik Örlikon mit Luftkühlung. Modell 1754.

600 kVA, 6300/55, 60, 65 V, 97/10 900, 10000, 9250 A, 50 Per/s.

E i s e n: Blechstärke 0,5 mm, Kernlänge 650 mm, wirksamer Querschnitt 639 cm², Verlust im Eisen 3,0—3,5—4,08 kW.
W i c k l u n g: Draht I 39 mm², II 3850 mm², Verlust 9,57—8,41—7,57 kW. — 2 Spulen in Reihe. Spannungsabfall Ohmscher 1,6—1,4—1,26 %, induktiv 7,8—7,2—6,9 %.
K ü h l u n g: künstlich; Luftmenge 100 m³/min bei etwa 40 mm Wassersäule.
G e w i c h t: Transformator allein 1,685 t, Gehäuse 0,745 t, zusammen 2,43 t. Die Sekundärwicklung besteht aus 7 parallelen nackten Kupferbändern von 2 mm Dicke und 275 mm Breite.



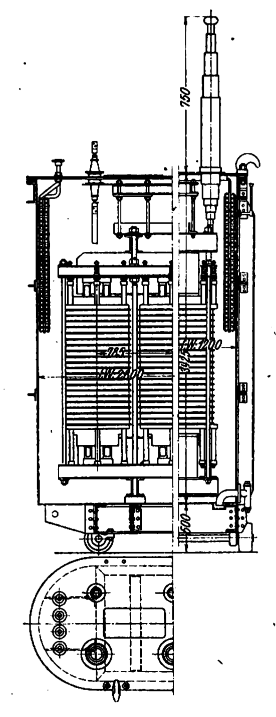




Abb. 325. Drehstrom-Transformator der Bergmann-Elektricitätswerke.

Modell WDO 6000/60.

6000 kVA, 8350/60000 V, 415/57,8 A, 50 Per/s. $\eta = 0{,}9875$ bei $\cos\varphi = 1$. Maßstab 1:80.

E i s e n: Blechstärke 0,5 mm, Kernlänge 1500 mm, Querschnitt 1080 mm², Papierisolation. Verlust 23,7 kW.
W i c k l u n g: Drahtstärke I 140 mm², II 16,8 mm², Schaltung Stern/Stern, Verlust 53 kW, Spannungsabfall Ohmscher 0,885 %, induktiv 8,05 %.
K ü h l u n g: Wasser, Kühlschlange 385 m, 30/35 mm ⌀, zwei parallele Kreise und Gegenströmung.
G e w i c h t: Transformator ohne Gehäuse und Öl 14 t, Gehäuse 4,5 t, Öl 7,5 t.

Der Drehtransformator ist wie ein Asynchronmotor mit senkrechter Welle gebaut; er dient zur Änderung der Spannung eines Einankerformers.

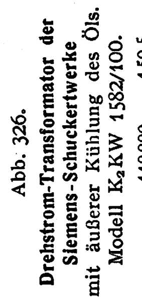


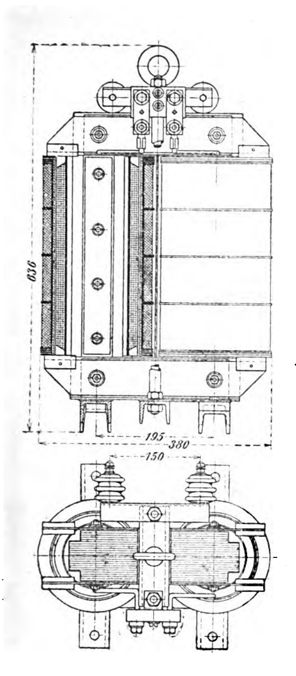
Abb. 326.

Drehstrom-Transformator der Siemens-Schuckertwerke mit äußerer Kühlung des Öls. Modell K_2KW 1582/100.

30000 kVA, $\frac{110000}{26000}$ V, $\frac{159{,}5}{675}$ A, 50 Per/s.

Maßstab 1 : 130.

Gewicht d. Transformators, aktive u. Konstruktionsteile 51,5 t; Kessel 8,5 t; Öl 24,5 t, Gesamtverluste 360 kW, Kühlschlange 750 m. Antrieb der Ölpumpe durch Drehstrommotor von 15 kW.



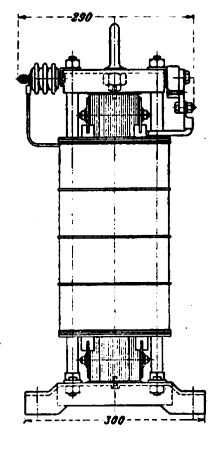


Abb. 327.

Einphasentransformator von Koch & Sterzel, Dresden.

10 kVA, 6000/220 V, 1,72/45,5 A, 50 Per/s, $\eta = 0{,}971$ bei $\cos\varphi = 1$, $\eta = 0{,}964$ bei $\cos\varphi = 0{,}8$; Kerntyp. Maßstab 1 : 12,5.

Eisen: Blechstärke 0,35 mm, legiert, zur Isol. 0,03 mm stark mit Asphaltlack gewalzt; 54 cm² Kernquerschn. (kreuzförm.), lichter Abstand der Kerne 110 mm, Kernlänge 330 mm; Stoßfugen gehobelt, stumpf gestoßen. Verlust: 100 W.

Wicklung: prim. 8 × 575 Wdg., sek. 2 × 85 Wdg.; Verlust 200 W; Spannungsabfall: Ohmscher 2,0 %, induktiver 3,8 %; Spulen konzentrisch, rund.

Gesamtgewicht: 150 kg.

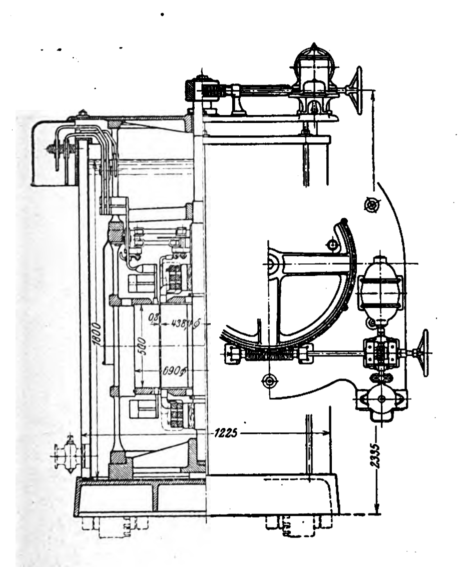


Abb. 328.

Drehtransformator der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin.

Modell OP 125. Maßstab 1:40.

115 kVA, 415/±43,5 V, 112/885 A, 50 Per/s. $\eta = 0{,}96$ bei $\cos\varphi = 1$.

Eisen: Blechstärke 0,35 mm, Isolation Papier, Verlust 2,5 kW.

Wicklung: Drahtstärke I 65 mm², II 440 mm², Verlust 2,2 kW. Schaltung I u. II unverkettet.

Kühlung: Öl.

Gewicht: Transformator ohne Ölkasten 3 t, Öl 1,5 t, insgesamt 5,1 t.

Der Drehtransformator ist wie ein Asynchronmotor mit senkrechter Welle gebaut und dient zur Änderung der Spannung eines Einankerumformers.

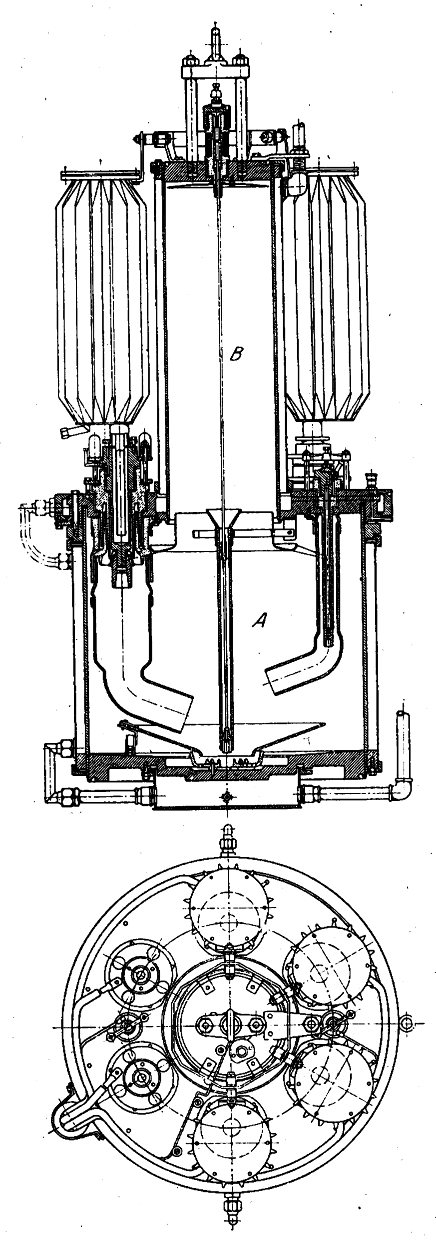


Abb. 329. Quecksilberdampf-Großgleichrichter von Brown, Boveri & Co. A.-G.
Modell G 4/6, Leistung 500 kW; ganze Höhe 10 m, Gesamtgewicht 1150 kg, Maßstab 1:17.
Beschreibung s. S. 359.

Vierter Abschnitt.

Sammler oder Akkumulatoren.

A. Aufbau und Wirkungsweise.

Allgemein verwendet wird der Bleisammler mit verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyt. Für besondere Zwecke, insbesondere für kleinere Leistungen, findet auch der alkalische Sammler Verwendung.

I. Der Bleisammler.

(578) Aufbau. Die positiven Platten des Bleisammlers haben als wirksamen Bestandteil Bleisuperoxyd, die negativen fein verteilten Bleischwamm. Als Träger dient Blei in Form von Platten oder Gittern, welche mit der wirksamen Masse überzogen bzw. gefüllt sind. Hiernach unterscheidet man

1. Platten, deren wirksame Schicht durch elektrischen Strom auf der Oberfläche erzeugt ist (Planté-Platten oder Oberflächenplatten), und
2. Platten, welche durch Eintragung von Bleiverbindungen mit verschiedenartigen Bindemitteln vermischt in gitter- oder rahmenförmige Träger und Umwandlung dieser Verbindungen in wirksame Masse durch elektrischen Strom (Faure-Platten) hergestellt werden. Ist der Träger ein gitterförmiger, so heißen die Platten Gitterplatten, ist derselbe rahmenförmig, so werden sie Masse- oder Rahmenplatten genannt. Der mit einem Bindemittel versetzten Paste von Bleioxyden werden vielfach Körper, wie Kaolin, Glaspulver usw. bei Herstellung der negativen Platte zugesetzt, die durch die Tätigkeit der Zelle nicht angegriffen werden und welche ein Schrumpfen des Bleischwammes und dadurch verursachtes Nachlassen der Leistungsfähigkeit dieser Plattenart verhindern.

Die erstere Art, die älteste, wird besonders für positive Platten angewendet, namentlich für ortsfeste Anlagen und für Traktionsbatterien, vielfach auch für Eisenbahnwagen- und Schiffsbeleuchtung, Telegraphenbatterien usw. Die Platten sind schwerer als diejenigen der zweiten Art, können dagegen sehr starke Entladeströme vertragen und auch mit größerer Stromdichte geladen werden.

Die zweite Art wird vorzugsweise für negative Platten, sowie vielfach auch für positive angewandt, letzteres besonders dann, wenn es auf geringes Gewicht der Batterie ankommt, wie bei Elektromobilen, elektrischen Lampen usw. Um das Herausspülen des lockeren Bleischwammes, das bei Zusatz oben erwähnter, chemisch unwirksamer Stoffe leicht eintritt, zu verhindern, verwendet die Accumulatorenfabrik A.-G. die sog. Kastenplatte, eine weitmaschige Gitterplatte, an deren Oberfläche zu beiden Seiten dünnes durchlochtes Bleiblech angegossen ist, so daß die Masse nicht herausfallen kann. Das Gitter selbst besteht bei allen Fabrikaten aus Hartblei mit 4 bis 8 % Antimongehalt.

(579) Der chemische Vorgang bei der Tätigkeit des Sammlers besteht während der Entladung in der Reduktion des Bleisuperoxyds an der +Platte und der

Oxydation des Bleischwammes an der —Platte. Das entstehende Oxyd bildet mit der Schwefelsäure des Elektrolyts schwefelsaures Blei:

$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb = 2PbSO_4 + 2H_2O.$$

Bei der Ladung erfolgt Oxydation an der +Platte und Reduktion an der —Platte:

$$2PbSO_4 + 2H_2O = PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb.$$

Es wird mithin bei der Entladung H_2SO_4 verbraucht, bei der Ladung wieder abgegeben, mithin muß das spez. Gewicht des Elektrolyts bei der Entladung sinken und bei der Ladung steigen. Für 1 Ah Entladung wird gemäß obiger Gleichung verbraucht: 3,85 g Blei, 4,46 g Bleisuperoxyd und 3,66 g Schwefelsäure, während 11,3 g Bleisulfat und 0,67 g Wasser gebildet werden. In Wirklichkeit muß eine wesentlich größere Menge von Blei, Schwefelsäure und Superoxyd vorhanden sein, als der theoretisch berechneten Menge entspricht. Das gebildete Bleisulfat ist im Gegensatz zum Blei und dessen Superoxyd ein Nichtleiter. Daher ist eine völlige Ausnutzung der wirksamen Masse durch die wachsende Erschwerung der Stromableitung nicht möglich; ferner wird das innerhalb der Masse befindliche Elektrolyt durch den steigenden Verbrauch der Schwefelsäure immer schlechter leitend.

Die Dichte der Säure wird von der Mehrzahl der Fabrikanten für einen geladenen Akkumulator zu 1,2 angenommen. Bei dieser Dichte, genauer bei 1,22, hat die Schwefelsäure ihre beste Leitfähigkeit. Sammler für tragbare Zwecke, die leicht gebaut sein müssen, und daher besonders enge Plattenstellung haben, erfordern ein Elektrolyt von größerer Säuredichte, bis 1,25 und noch höher. Mit steigender Säuredichte wird die Haltbarkeit der Platten nachteilig beeinflußt.

(580) Die elektromotorische Kraft beträgt rund 2 V; sie ist abhängig von der Säuredichte. Innerhalb 1,10—1,30 spez. Gewicht ist die Ruhespannung des Akkumulators, die der EMK entspricht, fast genau gleich $0{,}84 + d$, wobei d das spez. Gewicht der Säure bedeutet. Die Ruhespannung beträgt bei einem spez. Gewicht von 1,10—1,20—1,30 bzw. 1,94—2,04—2,14. Die EMK ist praktisch unabhängig von der Temperatur.

Die Klemmenspannung bei der Entladung ist abhängig von der Stromstärke. Sie fällt im Laufe der Entladung erst langsam, dann schneller und schließlich plötzlich bis auf 0. Nach dem Einschalten zur Entladung erfolgt zunächst ein plötzlicher Abfall um einige hundertstel Volt entsprechend dem Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand. Dann sinkt die Spannung ganz allmählich (Abb. 101, S. 192), welcher Abfall bedingt ist

1. durch den inneren Widerstand des Elementes,
2. durch die Verarmung des Elektrolyts an Schwefelsäure in der wirksamen Masse infolge Bildung von Bleisulfat; die Spannung ist ja abhängig von der Säuredichte,
3. durch das allmähliche Anwachsen des Widerstandes der Masse infolge der Bildung des Bleisulfats.

Der mit der Entladung eintretenden Verarmung an Schwefelsäure wird entgegengewirkt durch eine Zufuhr von neuer durch Diffusion. Ein schnelleres Sinken der Spannung wird dadurch verhindert und die Entladekurve senkt sich ganz langsam.

Zunächst findet die Bildung des Sulfats im wesentlichen in den äußeren Schichten der wirksamen Masse statt und zieht sich mit fortschreitender Entladung weiter in das Innere. Dort wird aber die Zufuhr von Schwefelsäure immer mehr erschwert, da sie nicht nur weitere Wege zurückzulegen hat, sondern auch, weil, da Bleisulfat einen größeren Raum einnimmt als Blei und Superoxyd, die Poren der Masse immer mehr verengt werden. Infolgedessen nimmt gegen Ende der Entladung die Verarmung an Schwefelsäure schneller zu und die Spannung der Platte sinkt daher schneller, bis infolge völligen Mangels die Spannung schnell und plötz-

lich fast auf 0 fällt. Sobald dieser Augenblick bei nur einer Plattenart eintritt, fällt auch die Klemmenspannung des Elementes völlig ab; die andere Platte kann dabei noch Strom abzugeben in der Lage sein. Bei richtiger Bemessung der Platten ist die positive Platte zuerst erschöpft.

Wird nun das Element abgeschaltet, so steigt nach kurzer Zeit die Spannung wieder auf die Ruhespannung, deren Höhe von der nun herrschenden Säuredichte im Element abhängt. Die Ursache dieser Spannungserhöhung ist die erneute Zufuhr von Säure in die wirksame Plattenmasse durch Diffusion, der jetzt kein Verbrauch gegenübersteht. Man kann mithin aus dem Spannungswert einer ruhenden Zelle nicht ihren Entladezustand beurteilen. Der letztere ist im Ruhezustand nur aus der Säuredichte zu schätzen.

Die mittlere Klemmenspannung bei der Entladung ist von der Beanspruchung abhängig. Sie beträgt, wenn der Ladeinhalt (die Kapazität) entnommen wird in 1 h: 1,80 V, in 3 h: 1,85 V, in 5 h: 1,87 V, in 10 h: 1,92 V. Als Endspannung bei der Entladung wird von den Fabriken zugelassen für Entladezeiten

bis zu 2 h und kürzer eine Endspannung von 1,70 bis 1,75 V
bei 3 bis 5 h Entladung eine solche von 1,80 bis 1,83 V
bei 3½ bis 10 h „ „ „ „ 1,83 V

Öfteres Überschreiten der Endspannung hat auf die Haltbarkeit nachteiligen Einfluß.

Bei der Ladung findet der umgekehrte Vorgang statt. Das Bleisulfat wird auf beiden Plattenarten zersetzt. Bei Einschaltung zur Ladung steigt zunächst die Klemmenspannung schnell soweit an, als es dem Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand des Elementes entspricht. Dann erfolgt durch Freiwerden der Schwefelsäure weiteres ganz allmähliches Ansteigen. Die Säure wird durch Diffusion fortgeführt. Die äußeren Masseschichten werden zunächst umgebildet und allmählich zieht sich der Vorgang in das Innere. Sobald der größte Teil des Sulfats zersetzt und in Superoxyd verwandelt ist, dem Strom also nicht mehr in genügender Menge zur Verfügung steht, beginnt die Zersetzung der Schwefelsäure unter gleichzeitig schärferem Anstieg der Spannung. Dieser Vorgang macht sich durch Auftreten einer Gasentwicklung bemerkbar. Sie beginnt bei den positiven Platten zuerst und zwar bei einer vierstündigen gesamten Aufladezeit etwa nach 2½stündiger Ladung. An der negativen Platte entweicht Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff, doch tritt die Sauerstoffentwicklung zuerst auf. Die Spannung steigt nun schnell bis zu 2,75 V, worauf ein weiteres Steigen nicht mehr stattfindet. Bei Ladung mit schwächerer Stromstärke ist die Endspannung niedriger, so ist sie z. B. bei 8stündiger Ladedauer etwa 2,6 V. Die Gasentwicklung bedeutet natürlich einen Energieverlust, doch ist häufigeres Aufladen bis zur vollen Gasentwicklung für gute Erhaltung der Platten wenigstens in Zwischenräumen durchaus erforderlich.

Da sich die bei der Ladung aus der Masse der Platten austretende Schwefelsäure im unteren Teil des Elementes ansammelt, dient die Gasung auch dazu, die Säure im Elektrolyt zu verteilen und die Säuredichte etwas auszugleichen. Man ermäßigt aber zweckmäßig den Ladestrom mit Eintritt der Gasentwicklung.

Die Menge des am Ende der Ladung entwickelten Knallgases beträgt für 1 Ah 0,626 Liter bei 0° und 760 mm Druck bzw. 0,7 Liter bei 30° Die explosionssichere Grenze der Knallgas enthaltenden Luft liegt bei einem Höchstgehalt von 6 v. H. Wasserstoff. entsprechend 9 v. H. Knallgas. Letzteres muß also mindestens eine 10fache Verdünnung mit Luft erhalten, zweckmäßig nimmt man eine 20—30fache Verdünnung.

Man kann auch mit gleichbleibender niedriger Spannung laden und wählt dazu zweckmäßig etwa 2,3 bis 2,4 V für die Zelle. Hierbei ist die Stromstärke bei Beginn der Ladung verhältnismäßig groß, sinkt aber schnell. Das Verfahren wird vielfach bei elektrischer Eisenbahnwagenbeleuchtung angewendet.

(581) Der innere Widerstand ist sehr gering und beträgt bei größeren Zellen unter 0,001 Ω. Mit fortschreitender Entladung steigt er etwas. Für eine Zelle der Type J 3 der Accumulatorenfabrik A.-G. ist der innere Widerstand im geladenen Zustande mit 0,00119 gemessen und steigt bei Entladung bis 0,00182 Ω.

(582) Der Inhalt (Ladeinhalt, Kapazität) eines Sammlers ist die Zahl der Amperestunden, welche die Zelle abzugeben vermag, ehe ihre Spannung unter eine festgesetzte Grenze herabgesunken ist. Die Strommenge, welche der geladene Sammler abgeben kann, ist abhängig von der Entladestromstärke. Setzt man den Inhalt eines Sammlers bei 3stündiger Entladung = 1, so ist derselbe bei 1stündiger Entladung 0,69, bei 2stündiger Entladung 0,82, bei 5stündiger Entladung 1,11, bei 7½stündiger Entladung 1,23 und bei 10stündiger Entladung 1,34. Auch die Temperatur hat Einfluß und zwar ändert sich der Inhalt um etwa 1 % für 1° bei mittlerer Temperatur. Dies findet seine Erklärung darin, daß mit steigender Temperatur die Säure dünnflüssiger wird, infolgedessen findet der Säureausgleich schneller statt und die Entladekurve liegt daher höher, die Ladekurve etwas niedriger als bei mittlerer Temperatur.

(583) Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der entladenen Wattstunden zu dem zur Ladung aufgewendeten Betrag, in der Praxis etwa 75 v. H. und steigt etwas mit der Temperatur. Der Wirkungsgrad in Strommenge, d. h. das Verhältnis der entladenen Ah zu dem zur Ladung aufgewendeten Betrag, ist etwa 90 v. H. Bei Verwendung von Säure, die mit Metallen, wie Eisen, Mangan, Chrom, Edelmetallen, verunreinigt ist, wird er verschlechtert.

(584) Aufbau der Zellen. Die Platten werden in Gefäße eingebaut, deren Material sich nach Größe und Verwendungszweck richtet. Kleinere Zellen für ortsfeste Anlagen erhalten Glasgefäße, größere Holzkasten, welche innen mit Blei ausgekleidet sind. Tragbare Zellen werden meist in Hartgummigefäße eingebaut, kleinere auch in Zelluloid (vorausgesetzt, daß die Elementzahl einer Batterie nicht größer als 16 ist), sobald es auf geringes Gewicht und geringe Raumbeanspruchung ankommt. Sonst werden ausgebleite Holzkasten verwandt, oft auch Glasgefäße.

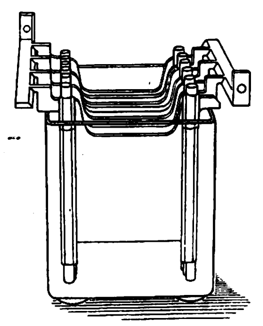


Abb. 330. Plattenaufhängung in einem ortsfesten Element.

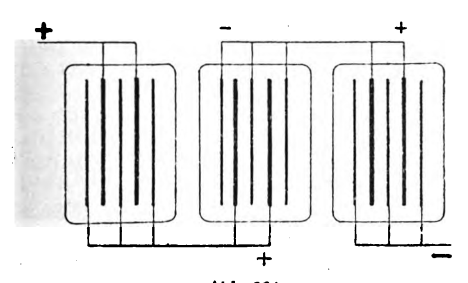
Im Gefäße sind die Platten so angeordnet, daß immer eine + (braune) und eine — (graue) Platte abwechseln. Die Zahl der — Platten ist um eine größer, so daß die äußeren Platten nur aus letzteren bestehen. Die Platten sind genau parallel zueinander eingebaut und werden durch Glasrohre, Hartgummistäbe, Holzstäbe usw. in richtigem gleichmäßigen Abstand voneinander gehalten. Die Accumulatorenfabrik A.-G. verwendet jetzt allgemein besonders behandelte dünne Holzbrettchen zwischen den Platten, welche durch Holzstäbe in ihrer Lage festgehalten werden. Die Holzstäbe haben Schlitze, durch welche die Brettchen durchgesteckt werden.

Zwischen dem Unterrand der Platten und dem Gefäßboden ist freier Raum gelassen, der die von den Platten im Betriebe abfallenden Teile aufnimmt. Ist dieser freie Raum von den abgefallenen Bleiverbindungen ausgefüllt, so muß das Element gereinigt werden, da sonst dieser Schlamm leitende Verbindung zwischen den Platten bildet. Der Schlamm besteht aus einem Gemisch von Bleisulfat und Bleisuperoxyd.

Die Platten werden mit besonderen Ansätzen auf Stützscheiben aus Glas gehängt, und zwar zweckmäßig so, daß der obere Rand der Stützscheiben außerhalb der Säure sich befindet, so daß sich auf ihm kein Schlamm ansammeln kann. Bei Glasgefäßen hängt man die Platte meist direkt auf den Rand des Gefäßes. Abb. 330 zeigt den Aufbau eines Elements in Glasgefäß.

Die gleichnamigen Platten einer Zelle werden untereinander leitend verbunden. Man richtet deswegen die stromführenden Fahnen der + Platte nach der einen, die der negativen nach der anderen Seite und verbindet sie durch übergelötete Bleistreifen. Durch Bleistreifen werden die positiven Platten der ersten Zelle untereinander und mit den negativen Platten der zweiten Zelle verbunden usw., wie in Abb. 331 dargestellt. Bei größeren Zellen erfolgt auch die Verbindung nach Abb. 332. Die Lötungen müssen ohne Verwendung von Zinn mit dem Gebläse ausgeführt werden. Nur wo Kupferverbindungen in die Bleileisten eingelötet sind, gebraucht man Zinn, das aber nach außen vollständig durch Blei verdeckt sein muß. Die ortsfesten Zellen werden mit Glasplatten abgedeckt, um die Verdunstung und das Versprühen der Säure zu vermindern, wodurch der Verbrauch an Nachfüllflüssigkeit ganz erheblich verringert und auch bewirkt wird, daß die säurehaltigen Dämpfe nur in geringem Maße in den Raum gelangen.

Für manche Zwecke hat man auch die flüssige Säure durch eine säuregetränkte feste Masse zu ersetzen gesucht, so durch Kieselgallerte, Torf, Glaswolle, ohne nennenswerten Erfolg.



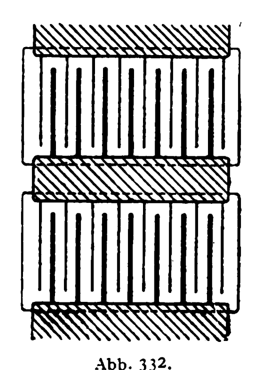



Abb. 331. Abb. 332.
Verbindung hintereinander geschalteter Elemente.

(585) Tragbare Akkumulatoren. Bei allen Verwendungsarten für tragbare Akkumulatoren kommt es hauptsächlich auf möglichst geringes Gewicht an, meist auch auf möglichst geringe Rauminanspruchnahme. Infolge dessen werden die Platten in Gefäße aus Hartgummi oder Zelluloid[1]) eingebaut, der Plattenabstand geringer als bei ortsfesten Anlagen genommen und die Platten vielfach leichter gebaut, was ihre Lebensdauer vermindert. Wie weit man mit der Verringerung des Plattengewichtes und des Plattenabstandes geht, hängt im wesentlichen davon ab, wie weit man Wert auf Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit der Anlage zu legen hat. Wo es auf diese beiden Punkte ankommt, wird man möglichst auf große Lebensdauer der Platten und Zuverlässigkeit des Betriebes sehen.

Die Leistung der Batterien für Lokomotiven und Triebwagen mit Oberflächenplatten ist etwa 8 Wh/kg bei 3stündiger Entladung, bei Akkumulatoren für Zugbeleuchtung ca. 10 Wh/kg bei 10stündiger Entladung bei Elementen der A c c u m u l a t o r e n f a b r i k A.-G. Wesentlich leichter sind die Batterien für den Betrieb von Automobilen, wo Batterien von 28—33 Wh/kg bei 5stündiger Entladung genommen werden.

(586) Akkumulatorenraum. Die Akkumulatorenräume ortsfester Batterien sind derart zu wählen und herzustellen, daß sie in der Nähe des Maschinenhauses gelegen, leicht zugänglich, möglichst hell, trocken, lüftungsfähig und möglichst geringen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Sie dürfen keinem anderen Zwecke dienen. Staub oder schädliche Gase und Dämpfe dürfen in den Raum nicht

[1]) Dieses Kastenmaterial ist nur zulässig bei Batterien von nicht mehr als 16 Zellen.

eintreten. Decken und Wände müssen so beschaffen sein, daß kein Mörtel usw. in die Elemente fallen kann. Der Fußboden besteht aus Sand und bestem Trinidadasphalt ($3^1/_2 : 1$); geringere Asphaltsorten sind nicht säurebeständig und daher völlig unbrauchbar. Der Asphaltbelag wird am besten ca. 30 mm dick gewählt. Das Einsinken der Gestelle macht man dadurch unmöglich, daß man an den Stützpunkten der Gestelle säurebeständige Mettlacher Platten in die Asphaltschicht einlegt, und zwar so, daß sie direkt auf dem unteren Grunde ruhen. Die Tragfähigkeit des Fußbodens muß an den Unterstützungspunkten der Batteriegestelle dauernd mindestens 4,75 kg/cm² bei der höchsten im Raume vorkommenden Temperatur betragen. Hölzerne Fußböden werden gut geteert, und zwar mit Steinkohlenteer, da Holzteer nicht säurebeständig ist. Die Batterien sind so aufzustellen, daß man jede Zelle genau besichtigen kann. Man läßt deshalb vor jedem Gestell 0,75 bis 1 m zur Bedienung der Zellen frei.

(587) Isolation. Die Zellen müssen gut sowohl untereinander als auch von der Erde isoliert werden. Das Batteriegestell besteht aus Holz. Ein Aufbau der Zellen in mehreren Reihen übereinander ist möglichst zu vermeiden. Zwischen den Zellen jeder Reihe und zwischen den Reihen selbst läßt man einen größeren Zwischenraum. Unter die Füße des Gestelles kommt Isolation aus Glas oder Porzellan. Die Teile des Gestelles sollen nicht durch metallene Schrauben, Bolzen usw., sondern durch Holzpflöcke verbunden werden. Die einzelnen Zellen erhalten nochmalige Isolation, indem man sie auf besondere Isolatoren aus Porzellan oder Glas stellt.

Soll die Isolation einer Sammlerbatterie gegen Erde gemessen werden, so verfährt man nach Liebenow (ETZ 1890, S. 360) in der Weise, daß man die Batterie zunächst vom Netz und der übrigen Anlage trennt und hierauf (nach Einschalten einer Bleisicherung) zunächst den einen Pol der Batterie durch einen Strommesser mit möglichst kleinem Widerstand an Erde legt. Man liest den durch den letzteren fließenden Strom I_1 ab und wiederholt dann dasselbe Verfahren am anderen Pol. Ergibt sich hier die Stromstärke I_2, und ist E die Spannung der Batterie, so erhält man als Gesamtisolationswiderstand der Batterie $R = E/(I_1 + I_2)$. Bei hohem Isolationswiderstand wird ein Galvanometer, sowie eine Hilfsbatterie benutzt, die derart zwischen das Galvanometer und die zu messenden Batterie geschaltet wird, daß sich die EMKe beider addieren. Ist der innere Widerstand des Galvanometers $= g$, der Hilfsbatterie $= r$, deren EMK $= e$, so berechnet sich der Widerstand des Isolationsfehlers nach der Formel

$$R = \frac{E + 2e}{I_1 + I_2} - (g + r).$$

Sind g und r nicht bekannt, so legt man ein Galvanometer (Nullinstrument) direkt zwischen Batteriepol und Erde, ebenso die Hilfsbatterie mit dem ersteren Galvanometer, vor welches man noch soviel Widerstand schaltet, daß das Nullinstrument keinen Ausschlag gibt. Die Messung wird an beiden Polen ausgeführt und es ist

$$R = \frac{E}{I_1 + I_2}.$$

Die EMK der Hilfsbatterie muß genügend groß sein, um das Nullinstrument mittels des Vorschaltwiderstandes auf Null zu bringen. Je größer der zu messende Isolationswiderstand der Batterie ist, desto kleiner kann die Hilfsbatterie sein.

Es empfiehlt sich, die eisernen Gestänge für die Verlegung der Zellenschalterleitung und Klemmenverbindungen nicht über den Elementen, sondern über den Gängen anzubringen. Für Flachkupferleitungen werden zweckmäßig Schienen mit abgerundeten Kanten gewählt, die verhindern, daß sich Säuretropfen auf der Oberkante festsetzen und oxydierend wirken. Blanke Leitungen werden mit Öl oder konsistentem Fett, Vaselin u. dgl. vor der ersten Ladung eingefettet und dies von Zeit zu Zeit wiederholt.

(588) Schwefelsäure. Die Säure muß ganz rein sein, besonders frei von Arsen, Salpeter- oder Salzsäure und Metallen der Schwefelwasserstoffgruppe. Sie wird mit reinem Wasser, am besten destilliertem Wasser verdünnt. Das Mischen der Säure mit Wasser wird in großen Gefäßen vorgenommen. Man gießt die Säure langsam und nach und nach unter Umrühren zum Wasser, nicht umgekehrt; die Mischung erhitzt sich beträchtlich. Am besten bezieht man die Säure in verdünntem Zustande von Säurefabriken, welche besonders sog. Akkumulatorensäure herstellen und für deren Reinheit garantieren. Zum Messen der Säuredichte benutzt man Aräometer. Die Säure ist am Boden der Gefäße unterhalb der Platten gewöhnlich dichter als zwischen und über diesen. Die Säure muß in den Elementen überall genügend hoch stehen. Zum Nachfüllen benutzt man destilliertes Wasser oder stark verdünnte Säure.

(589) Ladung und Entladung. Möglichst bald nach Einfüllen der Säure hat die erste Ladung einer Batterie zu erfolgen. Die Säure wird erst eingefüllt, wenn die Batterie vollständig aufgestellt und die Maschinenanlage betriebsfertig ist. Die Maschine wird in den Stromkreis der Batterie eingeschaltet, sobald ihre Spannung gleich derjenigen der Batterie ist. Der positive Pol der Batterie muß mit dem + Pol der Maschine verbunden sein, was sich leicht mit Polreagenzpapier feststellen läßt. Die Ladung ist beendet, wenn alle Platten lebhaft Gas entwickeln, und diese Gasentwicklung nach einer Stromunterbrechung von $1/4$ bis $1/2$ Stunde fast unmittelbar nach Einschalten des Stromes wieder einsetzt. Die Farbe der positiven Platten muß dunkelbraun, die der negativen hellgrau sein.

Als Stromstärke für die Ladung wird von den Fabriken die für die Größe der Zelle höchst zulässige angegeben; sie darf aber beliebig niedriger sein. In jedem Falle ist es für die Batterie vorteilhaft, wenn die Stromstärke gegen Ende der Ladung ermäßigt wird, um starke Gasentwicklung zu vermeiden, welche die Platten schädigt und Stromverluste verursacht. Jede Ladung ist so lange fortzusetzen, bis in sämtlichen Elementen beide Plattenarten lebhaft Gas entwickeln, und der Betriebswärter muß gegen Ende jeder Ladung nachsehen, ob in allen Elementen gleichmäßig und zu gleicher Zeit die Gasentwicklung beginnt. Bei Zurückbleiben eines oder mehrerer Elemente sind diese sofort zu untersuchen und in Ordnung zu bringen. Während der Ladung, besonders gegen deren Ende, muß der Batterieraum gut gelüftet werden. Nach Beendigung der Ladung läßt man die Spannung der Maschine etwas herabgehen, bis der Strom nahezu Null wird. Dann schaltet man aus. Zur Ladung werden allgemein Nebenschlußmaschinen benutzt. Soll zur Ladung eine Maschine mit gemischter Wicklung benutzt werden, so ist die Ladeleitung von den Bürsten abzuzweigen. Häufig ist es zweckmäßig, der Dynamomaschine, welche zur Speisung der Beleuchtungsanlage dient, für die Ladung der Batterie eine kleinere Maschine vorzuschalten (Zusatzmaschine), welche den Ladestrom dauernd aushält und etwa die Hälfte der Spannung der Lichtleitung liefern kann. Die Entladung ist beendet, wenn die Spannung rascher zu sinken beginnt. Weitere Stromentnahme ist schädlich für die Batterie.

Sollen Zellen einander parallel geschaltet werden, so muß dafür gesorgt werden, daß die parallelen Zellen entsprechend ihrer Größe Strom erhalten und liefern. Es empfiehlt sich, in jeden Zweig einen Strommesser und einen regulierbaren Widerstand einzuschalten. Sollen verschiedenartige Batterien oder neue und alte Elemente in dieser Weise zusammengeschaltet werden, so schaltet man am besten die neuen und die alten Elemente unter sich parallel und erst diese parallel geschalteten Reihen hintereinander.

In Zellen, welche zu weit oder mit zu starkem Strom entladen werden, oder bei denen ein Isolierfehler oder ein Kurzschluß vorliegt, wie auch in Zellen, welche längere Zeit aufgeladen stehen, nehmen die positiven Platten eine hellere rötliche oder graue Farbe an, indem sich Bleisulfat bildet. Dieses kann man, nachdem der etwaige Fehler beseitigt ist, durch fortgesetztes Laden mit Ruhepausen wieder in das braune Superoxyd der positiven Platten verwandeln. Das Aufladen mit Ruhe-

pausen, d. h. längeres Unterbrechen der Ladung nach eingetretener Gasentwicklung erfolgt nach den von der Fabrik gegebenen Vorschriften.

Wenn es nötig ist, die Batterie für längere Zeit unbenutzt stehen zu lassen, so muß sie vorher voll geladen werden, und man muß darauf achten, daß die Platten ganz mit Flüssigkeit bedeckt sind. Wenn möglich, soll etwa alle 14 Tage so lange geladen werden, bis Gasblasen entweichen. Sollen die Elemente monatelang unbenutzt bleiben, so zieht man am besten die Säure ab. Nach dem Wiedereinfüllen hat man dann zunächst gründlich mit Ruhepausen aufzuladen.

(590) Kurzschluß in einer Zelle wird außer durch genaue Besichtigung der Platten auch daran erkannt, daß gegen Ende der Ladung die Gasentwicklung ausbleibt oder später eintritt als in den benachbarten. Ebenso bleibt gegen Ende der Ladung die Spannung der Zelle zurück. Es ist eine Hauptbedingung für die Wirksamkeit eines Akkumulators, daß die positiven und die negativen Platten eines Elementes nicht in metallisch leitender Verbindung miteinander stehen. Jede solche stromleitende Verbindung zwischen beiden Plattenarten im Element bewirkt eine Entladung des betreffenden Elementes, welche nutzlos verloren geht und in ihren Folgen nicht nur Störungen im Betriebe veranlaßt, sondern auch besonders nachteilig auf die Lebensdauer der Platten einwirkt. Ein Kurzschluß kann entstehen

1. durch direkte Berührung zweier benachbarter Platten,
2. durch metallische stromleitende Stoffe (abgetropftes Lötblei, Bleischwamm, Bleisuperoxyd usw.), welche sich zwischen den Platten festsetzen,
3. durch mittelbare oder unmittelbare Berührung der Platten mit dem Bleimantel des Holzkastens.

Ist ein Kurzschluß stark genug, um die völlige Entladung eines Elementes herbeizuführen, so liegt die Gefahr nahe, daß die Platten hart werden (sulfatieren) und die weitere Aufnahmefähigkeit verlieren. Bei der Ladung bleibt dann der Strom ohne Wirkung auf die Platten, weil er seinen Weg durch den Kurzschluß nimmt; das Element wird nicht geladen und kommt deshalb nicht zur Gasentwicklung. Zuweilen tritt der Fall ein, daß derartige Elemente nach Entfernung eines lange vorhanden gewesenen Kurzschlusses Gas entwickeln, ohne daß sie geladen sind. Das rührt daher, daß die Platten hart sind, und der Strom nicht mehr einwirken kann. Die Säuredichte steigt in diesem Falle auch nicht bei der Ladung. Das Steigen der Säuredichte ist der einzige Maßstab für die fortschreitende Ladung. Durch Kurzschluß und die damit zusammenhängende zu tiefe Entladung wird oft ein Krümmen der Platten verursacht. Sind die Platten voneinander durch Glasrohre oder Hartgummistäbe isoliert, so kann man die Ursache eines Kurzschlusses meist mittels eines Holzstäbchens beseitigen. Ist dies nicht angängig, so muß die Zelle ausgebaut werden; an ihrer Stelle wird eine starke Kupferleitung als Überbrückung eingesetzt. Die Zelle wird entleert, auseinandergenommen und untersucht. Verbogene Platten richtet man wieder gerade. Ehe man die Zelle wieder in die Batterie einschaltet, ist zu empfehlen, sie mehrmals zu laden und zu beobachten, ob sie in Ordnung ist. Bei Zellen mit Holzbrettchen stellt man den Kurzschluß zweckmäßig mit Hilfe des sogenannten Kurzschlußfinders fest, einer eingekapselten Magnetnadel, welche nacheinander zwischen die Stromableitungen der Platten zu den Bleileisten gehalten wird. Die Magnetnadel wird dann, falls die Platten kurzschlußfrei sind, von Ableitung zu Ableitung keine oder nur sehr geringe Bewegung zeigen. Kommt man dagegen an eine Platte, die Kurzschluß hat, so wird die Nadel kräftig abgelenkt. Sind mehrere Kurzschlüsse in einem Element, so ändert die Nadel an jeder Platte, die Kurzschluß hat, ihre Lage in der vorerwähnten Weise.

Wird das Zurückbleiben der Zelle rechtzeitig bemerkt und der Kurzschluß sofort beseitigt, so wird die Zelle nach einer oder zwei Ladungen wieder sich gleich den übrigen verhalten, zumal wenn die Batterie etwas länger als nötig geladen wurde. Der Wärter hat deshalb die Pflicht, gegen Ende jeder Ladung den Batterieraum zu durchgehen und zu beobachten, ob alle Elemente gleichmäßig und gleich-

zeitig zur Gasentwicklung gelangen. Hierbei ist bei Anlagen mit Zellenschalter zu berücksichtigen, daß die ersten Zellenschalter-Elemente meist früher Gas entwickeln, einerseits weil sie weniger entladen werden, andererseits, weil sie oft durch den Netzstrom bei der Ladung auch mehr Strom erhalten als die übrigen.

(591) Garantie. Die Akkumutatoren-Fabriken leisten für die gelieferten ortsfesten Batterien und auch für größere Batterien für transportable Einrichtungen, wie Lokomotiven, Triebwagen, Boote, eine einjährige Garantie in der Weise, daß sie sich verpflichten, die garantierte Kapazität wieder herzustellen, falls diese innerhalb der Garantiedauer unter die garantierte Grenze sinken sollte, wobei bedungen wird, daß die gegebenen leicht zu erfüllenden Vorschriften für die Behandlung der Batterien gewissenhaft befolgt werden, und daß die Füllsäure die geforderte Beschaffenheit besitzt. Auch übernehmen die Fabriken zu bestimmten nach dem Anschaffungspreis der Batterie bemessenen Sätzen — dieselben betrugen bis zum Kriegsausbruche etwa 6 bis 10% jährlich bei täglich einmaliger Entladung im Durchschnitt — die fortdauernde Unterhaltung der Sammler, den Ersatz schadhaft werdender Teile und verpflichten sich außerdem, die Batterien nach einem bestimmten Zeitraum — meist 10 Jahre — in bestem Zustand zu übergeben.

Literatur: F. Grünwald, Die Herstellung der Akkumulatoren. Halle a. S., 1903, Wilh. Knapp. — K. Elbs, Die Akkumulatoren. 2. Aufl. Leipzig 1908, Joh. Ambr. Barth. — W. Bein, Elemente und Akkumulatoren, ihre Theorie und Technik. Leipzig 1908, Joh. Ambros. Barth. — W. Bermbach, Die Akkumulatoren. 2. Aufl. Leipzig 1911, Otto Wigand. — Alfred Wogrinz, Elemente und Akkumulatoren, ihre Wirkungsweise und Behandlung. Wien und Leipzig 1914, Franz Deuticke. — L. Lucas, Die Akkumulatoren und galvanischen Elemente. 2. Aufl. Hannover 1917, Dr. Max Jänecke. — C. Heim, Die Akkumulatoren für stationäre elektrische Anlagen. 5. Aufl. Leipzig, 1918, Oskar Leiner. — L. Jumeau, Les Accumulateurs. Paris 1907, Dunod et Pinat. — L. Lyndon, Storage Battery Engineering. New York 1903. — A. E. Watson, Storage Batteries. Lynn, Mass. 1911. — Fr. Dolezalek, Die Theorie des Bleiakkumulators. Halle a. S. 1901, Wilh. Knapp.

II. Der alkalische Sammler.

(592) Arten. Bisher wurden 2 Arten fabrikmäßig hergestellt, der Edisonsche und der Jungnersche Akkumulator. Ersterer wird hergestellt von der Edison Storage Battery Co., Orange, N. Y., seit 1901 und seit 1905 in Deutschland von der Deutschen Edison-Akkumulatoren-Company G. m. b. H., Berlin, letzterer von der Svenska Ackumulator A. B. Jungner, Stockholm.

Über den Edison-Akkumulator liegen allein eingehende Untersuchungen vor, daher beziehen sich die folgenden Ausführungen auf diesen. Der Jungner-Akkumulator ist in seinen Eigenschaften und seiner Wirkungsweise ähnlich[1]).

(593) Chemischer Vorgang. Für die positive Platte wird Nickelhydroxydul, vermischt mit feinem metallischem Nickel oder Graphit, verwendet. Bei der Ladung geht das Nickelhydroxydul in eine höhere Oxydationsstufe über. Für die negativen Platten wird eine Eisen-Sauerstoff-Verbindung mit geringer Beimengung von Quecksilber benutzt, welche in der arbeitenden Platte einen außerordentlich feinen Eisenschlamm bildet. Bei der Ladung wird dieser zu metallischem Eisen reduziert.

Bei der Entladung erfolgt für beide Platten der chemische Vorgang in umgekehrter Richtung. Der Zusatz von metallischem Nickel oder Graphit in der Positiven und von Quecksilber in der Negativen dient zur Erhöhung der Leitungsfähigkeit dieser an und für sich schlecht oder nicht leitenden Massen. Der chemische Vorgang verläuft nach Förster gemäß folgender Gleichung:

---

[1]) Literatur: Veröffentlichungen über den Edison-Akkumulator: W. E. Holland, The Edison Storage Battery. The Electrician, London, Bd. 66, S. 47, 1910. — M. Kammerhoff, Der Edison-Akkumulator. Berlin 1910, Julius Springer. — Joly, Die Edisonbatterie. The Electrical Times 17. Februar 1910. — Dr. Fritz Förster, Elektrochemie wässeriger Lösungen. Leipzig 1915, Joh. Ambrosius Barth. S. 222 u. ff.



$$Fe + Ni_2O_3 + 3H_2O = Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$$

und zwar erfolgt der Vorgang für die Entladung von links nach rechts und für die Ladung von rechts nach links.

(594) Aufbau der Zellen. Die Platten werden in Deutschland zurzeit in zwei Ausführungen geliefert und zwar sind die Negativen für beide Arten gleich. Die positiven Platten der ersten Art bestehen aus dünnen flachen, mit der aktiven Masse gefüllten Taschen aus fein durchlochtem, vernickeltem Eisenblech, die in Öffnungen eines vernickelten Eisenbleches eingesetzt und unter hydraulischen Druck stark zusammengepreßt werden, so daß die Taschen in dem Eisenblech festsitzen und die Masse in sich guten Kontakt erhält (Taschenplatten). Die negativen Platten sind den positiven gleichgebaut. Die Platten der zweiten Art haben als Behälter für die wirksame Masse der Positiven aufwärts stehende Röhrchen aus vernickeltem durchlochtem Stahlblech, in welche die Masse unter großem Druck eingepreßt wird (Röhrchenplatten). Bei Verwendung positiver Taschenplatten hat jede Zelle zwei positive Platten gegenüber einer negativen; bei positiven Röhrchenplatten ist in jeder Zelle eine negative Platte mehr enthalten als positive Platten.

Die Platten befinden sich bei beiden Ausführungsarten in einem aus vernickeltem Stahlblech autogen geschweißten Zellengefäß, auf welches nach Einbau des Plattensatzes der Deckel ebenfalls autogen aufgeschweißt wird. Die Polbolzen werden, durch Hartgummistopfbuchsen isoliert, durch Öffnungen im Deckel hindurchgeführt und erhalten zur Verbindung mit den Nachbarzellen besonders geformte Polschuhe mit konischem Sitz. Auf dem Deckel befindet sich außerdem die mit Ventil versehene Füllöffnung der Zelle. Die Isolation der positiven und negativen Platten gegeneinander und des gesamten Plattensatzes gegen das Gefäß besteht aus besonders behandeltem Hartgummi.

Da die Gefäße der Edisonzellen aus Metall und deshalb spannungsführend sind, so werden beim Zusammenbau der Zellen zu Batterien zwischen den ersteren bestimmte Luftzwischenräume freigelassen und die Zellen sind auch außerdem gegen den Batteriekasten geeignet isoliert. Ein direktes Aneinanderstellen von Edisonzellen ohne Isolierung und ohne Luftzwischenräume ist also streng zu vermeiden.

Als Elektrolyt dient ca. 22%ige, chemisch reine, mit einem Zusatz von Lithiumhydroxyd versehene Kalilauge; der Zusatz von Lithiumhydroxyd soll, wie Förster annimmt, wahrscheinlich die Schrumpfung der Oberfläche der positiven Masse verhindern und dadurch einer Abnahme des Ladeinhalts, die zumal bei zu hoher Außentemperatur leicht eintreten kann, entgegenwirken. Die Kalilauge wirkt in der Zelle nur als Stromträger. Ihr spezifisches Gewicht soll 1,2 betragen und darf, bezogen auf Laugentemperatur von 18° C., nach oben bis 1,23 und nach unten bis 1,16 schwanken. Die Nachfüllung als Ersatz für verdunstete Lauge erfolgt mit reinem destilliertem Wasser. Die richtige Zusammensetzung der Lauge und deren spez. Gewicht ist von wesentlichem Einfluß auf die Leistung der Zelle. Unter normalen Betriebsverhältnissen wird die Neufüllung von Edisonzellen mit Kalilauge etwa alle 9 bis 12 Monate erforderlich. Wiederholte Messungen des spez. Gewichts der Lauge sind empfehlenswert. In Deutschland werden zurzeit Zellen normal mit einem Inhalt von 1,25 bis einschließlich 450 Ah hergestellt.

(595) Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung. Die EMK beträgt etwa 1,4 V. Der Spannungsverlauf bei Ladung und Entladung ist aus den Schaulinien der Abb. 333 und 334 ersichtlich. Erstere bezieht sich auf Edisonzellen mit positiven Röhrchenplatten, welche normal 7stündige Ladung und 5stündige Entladung haben, in beiden Fällen mit gleicher Stromstärke. Die zweite Abbildung gilt für Zellen mit Taschenplatten mit 4stündiger Ladung und Entladung, wobei der Ladestrom höher ist als der Entladestrom. Die Ladung kann natürlich auch mit gleichbleibender Spannung und abfallender Stromstärke erfolgen, wobei unter

Verwendung einer Spannung von 1,67 V der Stromverlauf sich wie in Abb. 336 ergibt. Im Augenblick des Einschaltens der zuvor normal entladenen Zelle steigt der Ladestrom bis auf etwa das doppelte des normalen an, um jedoch rasch wieder abzufallen und nach $3^1/_4$ h die normale Stromstärke zu erreichen. Bei einer Netzspannung von 110 V können mithin 110/1,67 = 66 Edisonzellen in Hintereinanderschaltung ohne Vorschaltwiderstand geladen werden. Zwischenladungen können unter Berücksichtigung der Erwärmungsgrenzen für kurze Zeiten auch mit hohen Stromstärken erfolgen, wenn Betriebspausen und Ladegelegenheiten dies ermög-

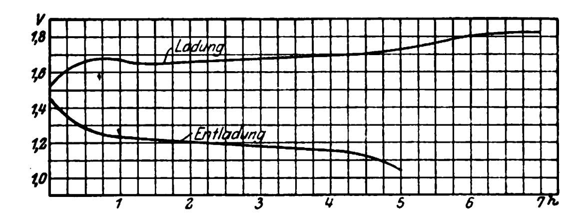


Abb. 333. Edisonzellen *T*, *B* und *A*, Spannung bei Ladung und Entladung.

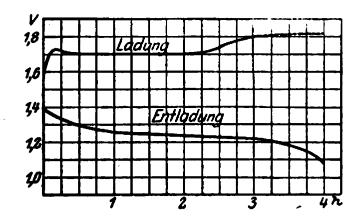


Abb. 334. Edisonzellen *F*, *FB* und *FA*, Spannung bei Ladung und Entladung,

Abb. 335. Edisonzellen *T*, *B* und *A*, Ladung mit verkürzter Ladezeit.

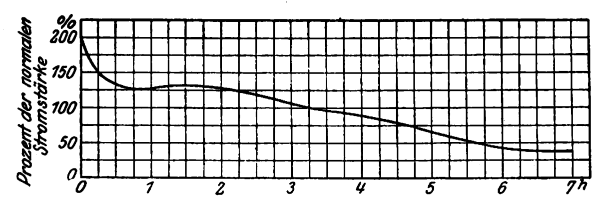


Abb. 336. Edisonzellen, Ladestrom bei Ladung mit gleichbleibender Spannung.

lichen. Die Ladekurve Abb. 335 zeigt eine von 7 auf 5 h verkürzte volle Ladung einer Zelle mit positiven Röhrchenplatten, unter Anwendung von Zwischenladungen und Berücksichtigung der Temperaturgrenzen durch stufenweise Verringerung des Ladestromes.

Starke Überladungen nach völliger Entladung schaden dem Edisonakkumulator auch bei dauerndem Vorkommen nicht.

Beendet ist die Ladung, wenn die Ladespannung etwa 1,82 V für eine Zelle erreicht hat, wenn diese Spannung beim Weiterladen nicht mehr steigt und mit dieser Spannung noch etwa 40 Minuten weiter geladen worden ist. Eine genaue Zahl kann jedoch nicht angegeben werden, da auch der Zustand und die Temperatur der in den Zellen befindlichen Kalilauge mitspricht. Als normal entladen gilt der Edisonakkumulator, wenn seine Klemmenspannung bei normaler Entlade-

stromstärke auf 1 V für die Zelle gesunken ist. Die mittlere Entladespannung ist dann 1,2 V für die Zelle. Andere Merkmale für Beendigung der Ladung und Entladung bestehen nicht.

(596) Inhalt. Der Ladeinhalt des Edisonsammlers wird durch die Höhe des Entladestromes praktisch nicht wesentlich beeinflußt. Bei höherer Belastung sinkt jedoch seine Spannung rascher als die der Bleizelle. Abb. 337 (nach Holland) gibt die Beziehungen der Leistungen und der mittleren Spannung zum Entladestrom für die Edisonzelle A 4 mit 150 Ah. Abb. 338 (nach Holland)

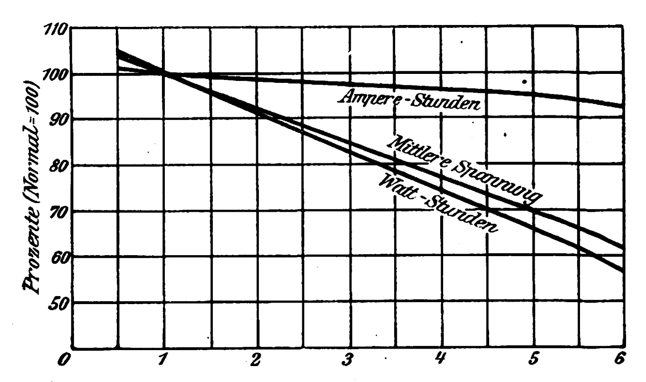


Abb. 337. Kapazität und Spannung einer Edisonzelle bei verschiedenen Entladeströmen

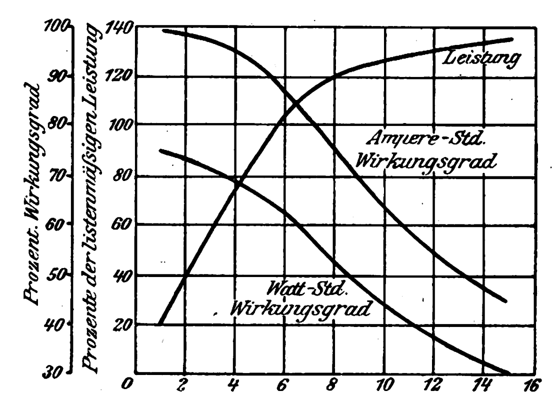


Abb. 338. Leistung und Wirkungsgrad einer Edisonzelle bei verschiedenen Ladezeiten und normalem Ladestrom.

stellt Leistung und Wirkungsgrad dar bei verschiedenen Ladezeiten und normalem Ladestrom der Zelle A 4. Der Arbeitsinhalt der Zellen Type A 4 mit positiven Röhrchenplatten wird von Holland mit 33,6 Wh/kg angegeben.

Durch längere Ladung läßt sich der Ladeinhalt des Edisonsammlers nicht unwesentlich über den normalen hinaus erhöhen. Laugentemperaturen über 50° C. in den Zellen sind zu vermeiden, weil dadurch Leistung und bei öfteren Wiederholungen auch die Lebensdauer der Zellen leiden. Der innere Widerstand ist abhängig von der Zellengröße und beträgt nach E. W. Holland für die Zelle A 6 mit 225 Ah im Mittel ca. 0,0024 Ω und für die Zelle A 4 mit 150 Ah 0,0035 Ω.

Unter normalen Umständen ist der Wirkungsgrad des Edisonakkumulators in Ah etwa 72%, in Wh etwa 52%.

(597) Die Bedienungsvorschrift, welche zurzeit für die in Deutschland hergestellten Edisonbatterien Anwendung findet, ist nachstehend im Wortlaut wiedergegeben und zwar bezogen auf eine Automobilbatterie von 80 V mit 67 Zellen A 6 mit 225 Ah, mittlere Klemmenspannung 80 V, Entladestrom 45 A, Ladestrom 45 A, Ladezeit 7 h. Erforderliche höchste Ladespannung 122 V.

1. Füllung der Batterie. Die Füllung erfolgt mit der von der Fabrik mitgegebenen oder bezogenen Kalilauge. Alle Zellenverschlüsse sind zu öffnen. Die Kalilauge wird mittels Glastrichters vorsichtig unter Vermeidung von Übergießen in die Zellen eingefüllt, bis sie 12 mm über der Oberkante des Plattensatzes steht. Zur Prüfung des Laugestandes führe man das an beiden Enden offene, der Batterie mitgegebene Glasröhrchen vorsichtig in die Zellenöffnung ein, bis es auf dem Plattensatz aufsteht. Man verschließe es oben mit dem Finger und nehme es so heraus. Der Laugestand im Glasröhrchen zeigt alsdann den Laugestand über Oberkante des Plattensatzes in der Zelle. Jede Zelle ist nach Füllung sofort zu verschließen.

2. Die Füllflüssigkeit (Elektrolyt) ist besondere Kalilauge von 1,2 spez. Gewicht (ca. 22% KOH). Sie ist von der Fabrik oder deren Vertretung zu beziehen, da im Handel nicht in richtiger Zusammensetzung erhältlich. (Siehe 5.)

3. Ladung. Kam die Batterie ungefüllt zum Versand, so hat die erste Ladung 15 Stunden lang mit dem oben angegebenen Ladestrom zu erfolgen. Die Ladung kann 2 Stunden nach vollendeter Füllung der Zellen mit Lauge beginnen. Wenn erforderlich, kann die Ladung unterbrochen werden, eine Entladung darf aber vor Beendigung der vollen Ladung nicht erfolgen.

Die weiteren normalen Ladungen haben mit dem vorgeschriebenen Ladestrom in der angegebenen Ladezeit zu erfolgen. Bedingen die Verhältnisse andere Ladezeit und anderen Ladestrom, so ist darüber die Fabrik zu befragen.

Beendet ist die Ladung, wenn die Ladespannung nicht mehr steigt und wenn dann noch 40 Minuten lang weitergeladen wurde. Die normale Ladung ersetzt nur die vorausgegangene normale Entladung. Tiefere Entladung schadet nicht, bedingt aber dann eine darauffolgende längere Ladung.

4. Überladungen. Neue Batterien müssen nach jeder 12. Entladung 15 Stunden lang mit dem vorgeschriebenen Ladestrom geladen werden, bis 4 solcher Überladungen erfolgt sind. Später ist die Batterie alle 2 Monate einmal in dieser Weise zu überladen.

5. Nachfüllung der Batterie. Als Ersatz für verdunstete Lauge wird reines destilliertes Wasser nachgefüllt, während aus den Zellen verschüttete Lauge durch Ersatzlauge zu ergänzen ist, die von der Fabrik bezogen werden muß. Durch Stichproben mit dem Glasröhrchen ist der Laugestand in den Zellen öfter vor Beginn der Ladung zu prüfen.

6. Messung der Kalilauge. Die Kalilauge in den Zellen muß von Zeit zu Zeit, aber immer unmittelbar nach einer vollen Aufladung der Batterie, auf deren Dichte (spez. Gewicht) geprüft werden. Die Prüfung erfolgt mit Areometer und Saugheber aus Glas. Das spez. Gewicht soll 1,2 sein, darf aber nach oben bis 1,23 und nach unten bis 1,16 schwanken, bezogen auf 18° C. Laugetemperatur. Ist das spez. Gewicht höher als 1,23, so ist etwas Lauge aus den Zellen abzusaugen und durch destilliertes Wasser zu ersetzen. Ist es unter 1,16, so ist mit Lauge anstatt destilliertem Wasser nachzufüllen, bis durch solche Änderungen das richtige spez. Gewicht von 1,2 wieder erreicht ist.

7. Neufüllung der Batterie sollte, je nach Art des Betriebes, alle 9 bis 12 Monate mit frischer Kalilauge erfolgen. Die Zellen sind zu diesem Zweck tief zu entladen, die alte Lauge ist unter Umschütteln auszugießen, mit reinem destilliertem Wasser ist gut nachzuschwenken und dann mit der Neufüllung zu

beginnen. Auf solche Neufüllung muß eine 15stündige Ladung folgen. Übergießen von Kalilauge oder destilliertem Wasser ist zu vermeiden, es verschlechtert die Isolation der Zellen untereinander und verursacht Selbstentladung.

8. Aufbewahrung von Kalilauge darf nur in reinen Eisengefäßen erfolgen, die nicht gelötet, verzinnt, verzinkt, verkupfert oder irgendwie mit Blei oder Messingteilen versehen sind. Das Gefäß ist luftdicht verschlossen zu halten. Luftzutritt verunreinigt und verschlechtert die Kalilauge. Bei Bestellung von Lauge ist die Zellentype und gewünschte Laugenmenge oder Zahl zu füllender Zellen anzugeben.

9. Besonders zu beachten. Batteriekästen und Zellen sind immer rein und trocken und alle Zellenverschlüsse verschlossen zu halten. Beim Laden Kastendeckel öffnen, Gas abziehen lassen. Niemals offenes Feuer (Streichholz, Zigarre, Licht usw.) in die Nähe der Batterie bringen. Batterie nicht im gleichen Raum mit Bleibatterie laden, die Schwefelsäuredämpfe der letzteren schaden der Edisonbatterie. Niemals Schwefelsäure in Edisonzellen einfüllen, sie werden dadurch meist unrettbar verdorben.

B. Technische Anwendung der Akkumulatoren.

Dieser Abschnitt gilt zwar allgemein, doch wird darin in erster Linie nur der Bleisammler berücksichtigt, weil der alkalische Sammler zur Zeit noch wenig benutzt wird.

(598) Die Aufspeicherung von Elektrizität in Akkumulatoren ergibt für elektrische Beleuchtungs- und Kraftanlagen folgende Vorteile:

1. Abkürzung des Maschinenbetriebes. Man kann den Maschinenbetrieb auf eine wirtschaftliche Dauer beschränken und den weiteren Kraftbedarf aus der Batterie decken; die Maschinenanlage wird auf diese Weise während des Betriebes durch volle Belastung gut ausgenutzt. Bei größeren Beleuchtungsanlagen pflegt die Belastung der Maschine eine sehr ungleichmäßige zu sein. Nach Aufhören des Werkstattbetriebes in der Hauptbeleuchtungszeit, wo der größte Teil der Lampen brennt, wird die Beleuchtung und der Kraftbedarf der Maschine ein sehr geringer sein, wie dies in später Nacht- und früher Morgenstunde der Fall ist. Diesen geringen Bedarf wird man zweckmäßig aus der Batterie decken und die Maschine nach Aufhören des Hauptbedarfes stillsetzen. Vgl. auch (635).

2. Bessere Ausnutzung einer gleichmäßigen Betriebskraft, z. B. einer Wasserkraft, indem man in den Stunden, in denen der Werkstattbetrieb ruht, die überschüssige Kraft in der Batterie aufspeichert. Die aufgespeicherte Elektrizität wird dann verwandt, wenn die vorhandene Betriebskraft für bestimmte Zeit nicht ausreicht, um den Bedarf zu decken.

3. Ausgleich von Spannungsschwankungen. Durch Parallelschalten einer Batterie mit einer Maschine, deren Geschwindigkeit sehr schwankt, verringert oder beseitigt man die Spannungsschwankungen. Man erzielt alsdann ruhiges Licht unter Erhöhung der Lebensdauer der Glühlampen.

4. Pufferbatterie zum Ausgleich der Belastung einer elektrischen Anlage mit stark schwankendem Kraftverbrauch, wie elektrische Straßenbahnen, Förderanlagen usw. Bei Straßenbahnen übersteigt der Bedarf an elektrischer Energie, wenn viele Wagen gleichzeitig anfahren, den mittleren Bedarf oft plötzlich um ein Vielfaches, um gleich darauf tief unter das Mittel zu sinken. Ohne Batterie müßte die Dampfmaschinenanlage für die höchste Leistung eingerichtet sein und würde, da sie im Mittel viel weniger belastet wäre, mit nur geringem Wirkungsgrad arbeiten. Schaltet man dagegen eine Akkumulatorenbatterie parallel, so hat man nur eine Maschinenanlage für die mittlere Leistung nötig, da die Batterie den plötzlichen Mehrverbrauch leistet und bei Minderbedarf den Überschuß aufnimmt. Die Maschine arbeitet dann beständig mit voller Belastung, also unter den wirtschaftlich günstigsten Bedingungen.

5. Als Sicherung des Betriebes gegen Störungen bei etwaigem Versagen der Maschinenanlage. Von großer Wichtigkeit ist deshalb die Anordnung



von Batterien in elektrischen Beleuchtungsanlagen von solchen Bauten, in welchen sich Publikum in großer Zahl ansammelt, wie z. B. Theater, Warenhäuser usw.

6. Als Gleichstromtransformatoren, um z. B. den Strom elektrischer Zentralanlagen für galvanoplastische Betriebe in einen Strom niedriger Spannung von etwa 2 bis 20 V zu verwandeln. Die Zellen werden hintereinander geladen und alsdann in passende Gruppen geteilt durch die Bäder entladen.

Allgemein darf bei Einfügung von Batterien in Beleuchtungs- und Kraftanlagen die Maschinenanlage kleiner bemessen werden. Durch Einfügung von Batterien erreicht man Verbilligung der Betriebskosten, Vereinfachung der Bedienung, große Sicherheit durch Schaffung einer Momentreserve. Beim Zusammenarbeiten von Dynamomaschinen und Akkumulatoren ist es notwendig, die Schaltung so zu wählen, daß die Batterie in richtiger Weise zum Betriebe herangezogen wird und nicht durch übermäßige Beanspruchung, falsche Ladeweise usw. Schaden leidet.

(599) Verwendungszwecke von Sammlern. Ortsfeste Sammlerbatterien finden Anwendung in ortsfesten Licht- und Kraftanlagen aller Art, die mit Gleichstrom betrieben werden. Über letztere siehe (635), ferner in Telegraphenanlagen. Schaltung von Sammleranlagen siehe (635).

Tragbare Batterien werden benutzt:

1. zur Beleuchtung von Fahrzeugen, insbesondere Eisenbahnwagen (736ff.);
2. zur Beleuchtung in Handlampen, Glühlampen, Taschenlampen;
3. zur Notbeleuchtung (735);
4. zum Betriebe von Fahrzeugen, die auf Schienen laufen, besonders zum Betriebe von Lokomotiven, Triebwagen für Eisenbahnen, Grubenlokomotiven, fahrbaren Kranen, kleinen Lasttransportwagen;
5. zum Betriebe von Kraftwagen, sowie Transportkarren;
6. zum Betriebe von elektrischen Booten;
7. für Unterseeboote;
8. für Eisenbahn-Stellwerks- und Sicherungsanlagen;
9. zum Betriebe in Schwachstromanlagen, für Telegraphie, für Post- und Eisenbahnzwecke, Telephonie, Funkentelegraphie und
10. für Meßzwecke.

(600) Berechnung der Größe einer Batterie[1]. Entsprechend den Lade- und Entladekurven eines Akkumulators ist die Zahl der Elemente, welche zur Erzeugung einer bestimmten Spannung notwendig ist, je nach dem Lade- und Entladezustand verschieden. So sind notwendig zur Erzeugung von 110 V

bei Ruhespannung	110 : 2,07 = 53 Zellen,
am Ende der Entladung	110 : 1,83 = 60 Zellen
am Ende der Ladung	110 : 2,75 = 40 Zellen.

Die Veränderung der Zellenzahl erfolgt mittels eines Zellenschalters (635). Soll sowohl während Entladung als auch bei Ladung eine Stromlieferung der Batterie bei einer bestimmten Spannung erfolgen, so verwendet man einen Doppelzellenschalter. Zur Erzielung einer konstanten Spannung von 110 V ist bei der Entladung der Entladekontakt des Zellenschalters auf die 53. Zelle zu bringen (110 : 2,07 = 53) und mit fortschreitender Entladung weiter zu verschieben, so daß am Schlusse der Entladung 60 Zellen eingeschaltet sind. Beim Übergang zur Ladung ist der Entladekontakt auf die 52. Zelle einzustellen (110 : 2,13 = 52) und dann so weit zu verschieben, daß er am Schlusse der Ladung auf der 40. Zelle steht. Es muß also in diesem Falle $1/3$ der Zellen zum Schalten eingerichtet sein. Verzichtet man auf die Stromentnahme während der Ladung, so genügt $1/8$ der Zellenzahl. Wenn der Spannungsverlust in den Zuleitungen nicht vernachlässigt werden kann, so muß für je 1,83 V Verlust eine weitere Zelle zu der Batterie hinzugefügt und an den Zellenschalter angeschlossen werden. Während der Entladekontakt des Zellen-

[1]) Nach dem Schaltungsbuch der Accumulatorenfabrik Aktiengesellschaft, Berlin-Hagen i. W.

schalters nach der Höhe der verlangten Entladespannung eingestellt wird, dient der Ladekontakt lediglich dazu, im Verlauf der Ladung die wenig entladenen Schaltzellen, welche in erheblich kürzerer Zeit geladen werden als der übrige Teil der Batterie, nach und nach abzuschalten.

Die Vorteile einer Batterie lassen sich in Lichtanlagen am besten erzielen, wenn die Leistungsfähigkeit der Akkumulatorenbatterie ebenso groß ist wie die der Maschinenanlage. Vor Beginn des abendlichen Hauptbetriebes ist alsdann die Batterie unter günstiger Ausnutzung der Maschine zu laden, während des Hauptbetriebes arbeiten Maschine und Akkumutatoren unter gleicher Belastung mit. Sinkt indessen die Stromabgabe so weit, daß die Batterie sie allein decken kann, so wird die Maschinenanlage stillgesetzt und es besorgen die Akkumulatoren nunmehr den ferneren Betrieb, ohne weiterer Wartung zu bedürfen.

Wenn die Spannung an den Glühlampen und die tägliche Stromentnahme aus den Akkumulatoren festgesetzt ist, kann man zunächst die Größe und Anzahl der Zellen sowie die Spannung der Dynamo bestimmen. Die Größe der Zellen wird durch die während eines Tages der Batterie zu entnehmende Strommenge und durch die benötigte maximale Stromstärke bestimmt, für welche die Kapazität und die zulässige Entladestromstärke der zu wählenden Akkumulatorengröße ausreichen müssen. Man wählt die Zellen zweckmäßig etwas größer, um etwas Reserve zu haben und außerdem die Haltbarkeit der Elemente zu erhöhen. Zur Berechnung einer Batterie diene als Beispiel das Projekt der elektrischen Beleuchtung einer Fabrik, in welcher die Arbeitszeit von morgens 6 h bis mittags 12 h und von 1 bis abends 7 h währt. Die sämtlichen Glühlampen der Fabrik benötigen einen Strom von 300 A bei einer Spannung von 110 V, und zwar dauert der Lichtbedarf am kürzesten Tage im Winter von morgens 6—8 und nachmittags 4—7 h, also täglich zusammen 5 h, so daß zur Ladung der Batterie die Stunden von morgens 8—12 h und nachmittags 1—4 h, zusammen 7 h, übrig bleiben. Die gesamte Stromlieferung wird auf die Batterie und die Maschine so verteilt, daß die letztere sowohl bei Ladung wie bei Lichtbetrieb gleichmäßig belastet ist.

Die Batterie soll die Hälfte der Belastung, also 150 A decken. Bei einem Wirkungsgrad in Ah von 90% sind mithin in die Batterie zu laden $\frac{150 \cdot 5 \cdot 100}{90} = 833$ Ah. Da 7 h zur Verfügung stehen, ist die mittlere Leistung der Maschine ca. 130 Ah während der Ladung. Als Batterie würde die Zelle J 26 der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft mit einer Leistung von 156 Ah während 5 h zu wählen sein. Die Ladung mit im Mittel 130 A dauert etwa $6^1/_2$ h. Da die Maschine bei 60 Elementen von 2,4 V = 144 V noch den vollen Ladestrom geben muß, während gegen Ende der Ladung, also bei 165 V, dieser auf die Hälfte sinken darf, so würde eine Maschine von 150 A gerade noch ausreichen. Zur Berechnung der mittleren Leistung der Maschine in kW bestimmt man die Batterieleistung während der Entladung. Diese ist $150 \cdot 5 \cdot 110 : 1000 = 82{,}5$ kWh. Bei einem Wirkungsgrad der Batterie von 75 % in kWh benötigen wir mithin zur Ladung $82{,}5 \cdot 100 : 75 = 110$ kWh, während $6^1/_2$ h, also 16,9 kW, während der Entladung $82{,}5 : 5 = 16{,}5$ kW. Die Maschine läuft also $11^1/_2$ h mit etwa 16,5 kW.

Für die Berechnung von Batterien für Elektrizitätswerke im Anschluß an die Belastungskurve siehe ETZ 1891, Heft 45, für die Berechnung von Straßenbahnen mit Pufferbatterien ETZ 1899, Heft 5.

Bei Anlagen von etwa 100 kW kostete eine Batterie fertig aufgestellt in Deutschland (ohne Gebäude und Anschlußleitungen) für jedes Kilowatt Entladung bei dreistündiger Kapazität bis Kriegsausbruch ca. 250 M. Dieser Preis steigt etwas bei kleineren Batterien und sinkt bei größeren Batterien allmählich. Für größere Batterien konnte man 200 M/kW annehmen. Das Gewicht einer Batterie, welche 100 kW Entladung 3 h lang leistet, beträgt ca. 45 000 kg. Bei fünfstündiger Kapazität kostete eine 100 kW-Batterie ca. 375 M. und größere ca. 325 M. für jedes Kilowatt Entladung. Das Gewicht einer Batterie, welche 100 kW 5 h lang leistet, beträgt 67 000 kg.

Fünfter Abschnitt.

Das elektrische Kraftwerk.

Kraftmaschinen.

(601) Wahl der Betriebsmaschinen. Für den Betrieb von Kraftwerken stehen für große Leistungen Dampfturbinen, für mittlere Leistungen Dampfturbinen oder Kolbendampfmaschinen, Großgasmaschinen und Ölmaschinen, für kleinere Leistungen Kolbendampfmaschinen, Gas-, Ölmaschinen und Lokomobilen zur Verfügung. Hierzu treten für alle Leistungsstufen die Wasserturbinen. Zur Spitzendeckung finden vielfach Dieselmotoren und Lokomobilen Verwendung. Gasmaschinen sind dort besonders angebracht, wo es sich um Verwertung der Hochofenabgase oder um die rationelle Ausnutzung minderwertiger Brennstoffe handelt. Die zeitweise beliebten Sauggasmaschinen sind teils den Ölmaschinen gewichen, teils verschwinden sie, weil die kleinen Elektrizitätswerke durch die moderne Entwicklung der Überlandwerke zu Umformerwerken werden. Maßgebend für die Wahl der geeigneten Antriebsmaschinen sind: 1. Größe und Dauer der Belastung, 2. wirtschaftlichster Brennstoffverbrauch für die kWh, 3. Bezugs- und Preisverhältnisse des Brennstoffes, 4. Möglichkeit der Ausnutzung oder Verwertung von Nebenprodukten, 5. Betriebsbereitschaft, 6. Zweckmäßigkeit als Haupt- bzw. Zusatzantriebsmaschinen.

(602) Kolbendampfmaschinen. Bei Verwertung des gesamten Abdampfes kommen Einzylindermaschinen, bei Verwertung eines Teiles des Abdampfes oder bei kurzzeitiger Überlastung der Maschinen Zweifach-Expansionsmaschinen mit einem Dampfverbrauch von 10 bis 11 kg/kWh oder Dreifach-Expansionsmaschinen mit 8 bis 10 kg/kWh mit Kondensation und Überhitzung zur Verwendung. Mit Rücksicht auf die bessere thermische Ausnutzung, die höhere Umdrehungszahl, Platz- und Gewichtsersparnis und geringere Anschaffungskosten sind Dampfmaschinen stehender Anordnung vorzuziehen. Dampfmaschinen werden in Größen bis 5000 kW ausgeführt. Verbundmaschinen finden zweckmäßig bis 750 kW, darüber Dreifach-Expansionsmaschinen Anwendung. Für Leistungen über 1500 kW wird in den meisten Fällen die Aufstellung von Dampfturbinen vorzuziehen sein. Eine Verbesserung bedeutet die Stumpfsche Gleichstromdampfmaschine, die nur Einlaßventile besitzt, während der Auspuff durch die in der Mitte des Zylinders angebrachten Schlitze erfolgt, die durch den Kolben gesteuert werden. Die Anordnung ermöglicht eine gute thermische Ausnutzung, kleine schädliche Räume, hohes Vakuum, hohe Überhitzung, einzylindrige Ausführung, Vereinfachung der Anlage und dadurch Platz-, Gewichts- und Preisersparnis. Der Dampfverbrauch ist wesentlich günstiger als bei Verbundmaschinen und fast so günstig wie bei Dreifach-Expansionsmaschinen. Die Lokomobilen haben infolge der vorzüglichen Durchbildung (R. Wolf, Magdeburg-Buckau und H. Lanz, Mannheim) ihren Platz in kleineren und mittleren Anlagen und als Spitzendeckungsmaschinen behauptet. Sie werden bis zu Größen von 750 kW gebaut und zwar für die größeren Leistungen als Zwillingstandemmaschinen mit Überhitzung und Kondensation. Der Zusammenbau von Dampfmaschine und

Kessel ergibt im wesentlichen folgende Vorteile: Gute Wärmeausnutzung durch schwach belastete Heizfläche des Röhrenkessels, Möglichkeit der Verbrennung minderwertiger Brennstoffe, hohe Dampfspannung, Überhitzung, geringe Verluste durch Niederschlag des Dampfes, Heizung der Zylinder durch Kesselabgase und billige, wenig Raum beanspruchende Anlage. Der Kohlenverbrauch ist infolge vorstehender Vorteile günstiger als bei sonst gleich starken Dampfmaschinen; er beträgt bei Lokomobilen von 8 bis 150 kW 1,35 bis 1,2 kg/kWh und von 150 bis 750 kW 0,9 bis 0,7 kg/kWh.

(603) Dampfturbinen. Man unterscheidet Gleichdruck-(Aktions-) und Überdruck-(Reaktions-)turbinen. Bei den Aktionsturbinen wird der Dampf in den Leitschaufeln entspannt und ihm Geschwindigkeit und Richtung erteilt. Der Dampf tritt als freier Strahl in die Laufräder ein und verliert an Geschwindigkeit. Die Laufräder werden partiell beaufschlagt und haben gleiche Ein- und Austrittsquerschnitte. Die Aktionsturbine besitzt daher keinen Achsialschub und keine Spaltverluste, die Zwischenräume zwischen Leit- und Laufrad können verhältnismäßig groß gewählt werden. Bei der Reaktionsturbine findet in den Leitschaufeln nur eine teilweise Dampfentspannung statt, so daß die Geschwindigkeit des in die Laufräder eintretenden Dampfes geringer als bei der Aktionsturbine ist, dagegen noch einen gewissen Druck aufweist. Die Dampfentspannung verteilt sich also auf Leit- und Laufräder. Die Leitschaufeln werden voll beaufschlagt und erfahren eine Querschnittsverengung an der Austrittsseite. Die Reaktionsturbine weist demnach einen Achsialschub und Spaltverluste auf; ersterer muß durch besondere Entlastungskolben abgefangen, letztere müssen durch kleine Zwischenräume zwischen Leit- und Laufrad verringert werden. Zusammenfassend kann man sagen, bei der Aktionsturbine wird die Verminderung des Druckes und der Geschwindigkeit nacheinander getrennt in Leit- und Laufrad vorgenommen, bei der Reaktionsturbine finden diese Vorgänge dagegen gleichzeitig in Leit- und Laufrad statt.

Wegen der hohen Dampf- und Umfangsgeschwindigkeit der Schaufeln werden die Turbinen für größere Leistungen mehrstufig, ferner mit Druck- oder Geschwindigkeitsstufen ausgeführt. Durch Kombination entsteht eine Anzahl weiterer Systeme. Reine Aktionsturbinen nach Rateau, Zoelly: Görlitzer Maschinenbau-Anstalt, Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg. — Aktionsturbinen mit Geschwindigkeitsstufen nach Curtis: Elektra, Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg. — Reine Reaktionsturbinen nach Parsons: Brown, Boveri u. Cie. — Kombinierte Aktions- und Reaktionsturbinen: Melms u. Pfenniger, Union (Essen), Sulzer, Maffei-Schwarzkopf-Werke. — Turbinen mit kombinierten Druck- und Geschwindigkeitsstufen: AEG, Bergmann. Bei Ausnutzung des Abdampfes kommen Gegendruck- bzw. Zwischendampfturbinen zur Anwendung. Steht Abdampf, z. B. aus einer Kolbendampfmaschine zur Verfügung, wählt man Abdampfturbinen.

Der Dampfverbrauch der Turbinen entspricht dem guter Kolbenmaschinen, liegt teilweise sogar darunter. Er ist sehr abhängig von der Güte des Vakuums und der Höhe der Überhitzung und beträgt 8 bis 5 kg/kWh. Drehstrom-Turbogeneratoren für 3000 U/min werden bis 12 500 kVA, solche für 1500 U/min bis 25 000 kVA und für 1000 U/min bis 60 000 kVA ausgeführt. Gleichstromturbogeneratoren werden bei 3000 U/min bis 1000 kW, bei 1500 U/min bis 2500 kW gebaut. Die Vorteile der Dampfturbinen gegenüber Kolbenmaschinen sind: höhere Umdrehungszahlen, billigere Anlagekosten, ölfreies Kondensat, geringer Raumbedarf, Gewichtsersparnis, gleichförmiger Gang und geringere Abnutzung und Bedienung.

(604) Dampfkessel. Die wichtigsten für elektrische Kraftwerke in Frage kommenden Kesselarten sind in der folgenden Übersicht gekennzeichnet:

Nummer	Kesselart	Heizfläche in m²	Auf 1 m² Heizfläche bezogen						Wirkungsgrad	Bemerkungen.
			Grundfläche m²	Wasserinhalt l	Dampfinhalt kg	Verdampfende Oberfläche in m²	Gewicht kg	Verdampfung kg/h		
1.	Einflammrohrkessel	5 bis 60	0,82 0,55	150 260	50 100	0,5 0,2	210 270	25 30	68 75	Gallowayrohre zur Verstärkung des Wasserumlaufes nur bei gutem Zug.
2.	Zweiflammrohrkessel	30 bis 120	0,55 0,40	190 240	65 90	0,22 0,19	240 280	25 30	68 75	Notwendig für größere Heizflächen.
3.	Heizröhrenkessel	20 bis 150	0,5 0,19	100 65	25 22	0,15 0,08	110 90	10 12	69 78	Große Heizfläche auf kleiner Grundfläche. Rostfläche gering, gutes Speisewasser und Bedienung nötig.
4.	Wasserrohrkessel mit einem Oberkessel	10 bis 300	0,4 0,1	70 47	50 23	0,18 0,04	300 100	12 25	70 75	Starker Wasserumlauf, großer Rost möglich. Hohe Kesseldrücke üblich. Schwierige Reinigung.
5.	Steilrohr-(Hochleistungs-) Kessel	150 bis 750	0,1 0,07	40 40	16 11	0,02 0,017	166 153	40 40	75	Querkessel an der Stirnseite, kleine Grundfläche, Economiser direkt über dem Kessel, tadelloses Speisewasser. Schnelle Dampferzeugung.

Der unter 5 genannte Kesseltyp ist neuerdings in großen Kraftwerken mit stark wechselnder Belastung vielfach in Anwendung gekommen. Kessel mit Heizflächen über 150 m² erhalten automatische Feuerung (Kettenrost) mit einstellbarer Geschwindigkeit. Für minderwertiges Brennmaterial werden besondere Einrichtungen nötig. Auch die Frage der Unter- bzw. Überwindfeuerung ist neuerdings eingehender bearbeitet worden. Infolge der Kohlenknappheit werden voraussichtlich Ölfeuerungen eine gewisse Bedeutung erlangen. Diese arbeiten mit Zentrifugal-Dampfstrahl- und Druckluftzerstäubern. 1 kg Öl von 10 000 kcal soll 10 kg Dampf erzeugen. Vorteile: Fortfall der Kohlentransportanlage, Asche und Schlacke. Möglichkeit der Anbringung neben der Kohlenfeuerung.

(605) Nebenapparate. Einen wesentlichen und wichtigen Bestandteil der Dampfanlagen bilden die Einrichtungen zur Kondensation des Dampfes zwecks Rückgewinnung bereits warmen Wassers zur Kesselspeisung. Man unterscheidet Misch-, Oberflächen- und Strahlkondensationsanlagen. Bei den Mischkondensatoren wird der Dampf mit dem eingespritzten Kühlwasser vermischt. Sie sind billiger, sicherer im Betrieb und gebrauchen etwa 1/3 weniger Kühlwasser als Oberflächenkondensatoren, geben aber ein geringeres Vakuum. Bei Oberflächenkondensatoren wird der Dampf in Metallröhren niedergeschlagen, die durch Kühlwasser kalt gehalten werden. Dampf und Kühlwasser kommen nicht in Berührung miteinander. Bei dem Strahl-

kondensator wird durch Wasser von 0,6—0,8 Atm. Druck Dampf und Luft durch Düsenwirkung abgesaugt und der Dampf niedergeschlagen. Bei Dampfturbinen wird meist Oberflächenkondensation angewendet. Das Absaugen der Luft geschieht durch Luftpumpe oder Strahlapparat, dem durch besondere Pumpe das Druckwasser zugeführt wird. Die Kühlwasserpumpen mit Strahlpumpe und Kondensatpumpe sind oft in einem Aggregat vereinigt, das durch eine kleine Dampfturbine oder durch Elektromotor angetrieben wird. Für Mischkondensation mit getrennter Luftabsaugung ist eine Warmwasser-, für Oberflächenkondensation eine Kaltwasserpumpe, bei Oberflächenkondensatoren außerdem eine Kondensatpumpe erforderlich. Zum Absaugen des mit Öl vermischten Niederschlagswassers der Dampfmaschinenanlagen aus dem Ölabscheider gelangt eine Ölwasserpumpe zur Aufstellung. Bei Mangel an Kühlwasser werden sog. Kühltürme aufgestellt.

Um die aus dem Kessel abziehenden Heizgase weiter auszunutzen, werden im Fuchs Vorwärmer (Ekonomiser) eingebaut, die das Kesselspeisewasser bis auf 130° C. erwärmen können. Das zufließende Wasser soll wegen des Schwitzwassers an den Vorwärmerrohren auf mindestens 30° C. vorgewärmt sein. Die Rohre werden stehend und schlangenförmig angeordnet und außen durch dauernd auf- und abgehende Schaber vom Ruß befreit. Der Antrieb der Schaber erfolgt durch Elektromotor. Den für den Kessel erforderlichen Luftzug erzielt man durch Kamine oder durch elektrisch angetriebene Zentrifugal- bzw. Strahlgebläse. Die Gebläse werden vor oder hinter dem Rost angebracht. Bei Anwendung von Unterwindfeuerung muß der Aschenraum geschlossen sein. Die Zuführung des Brennstoffes zum Rost erfolgt in größeren Kesselanlagen automatisch unter Wägung. Für zweckmäßige und billig arbeitende Entaschungsanlagen ist zu sorgen. Für die Kesselspeisung dienen Kolbendampfpumpen, seltener Schleuderpumpen mit elektrischem Antrieb. Die Aufstellung geschieht am besten in einem besonderen Raume dicht neben dem Kesselhause.

(606) Verbrennungsmaschinen. Das Kraftgas wird unter Druck im Arbeitszylinder entzündet und plötzlich oder allmählich (Diesel) verbrannt. Die auf 13—14 bzw. 30—35 Atm gespannten Verbrennungsgase übertragen durch Expansion die Arbeit auf den Kolben. Man unterscheidet Zwei- und Viertaktmotoren. Bei ersteren wird das bereits durch besondere Pumpe verdichtete Gemisch dem Zylinder zugeführt. Die verbrannten Gase werden durch das frische Gemisch oder durch Spülluft aus dem Zylinder getrieben.

Bei den Viertaktmaschinen spielt sich der Arbeitsvorgang in 4 Hüben ab. 1. Ansaugen des Gas- und Luftgemisches, 2. Verdichtung der Ladung, 3. Verbrennen unter Leistung von Arbeit, 4. Ausstoßen der verbrannten Gase.

Die Zündung erfolgt durch Glührohr, Induktor oder durch die Kompressionswärme (Diesel). Die Regelung der Umdrehungen oder der Leistung erfolgt durch Veränderung der Menge der Ladung, durch Veränderung der Zusammensetzung der Ladung, durch Ermöglichung beider Regelungsweisen an derselben Maschine und durch Regelung auf gleichbleibendes Gemenge und gleichen Enddruck der Verdichtung. Das Anlassen geschieht durch Druckluft oder durch eine als Motor geschaltete Dynamomaschine. Der Kühlwasserbedarf beträgt bei Gasmaschinen 15—75, bei Dieselmaschinen 15—35 l/kWh.

Für den Kraftwerksbetrieb kommen hauptsächlich Dieselmotoren in Frage, die in stehender Ausführung von 20—150 kW einzylindrig und von 80—300 kW zweizylindrig, darüber hinaus drei- bis vierzylindrig ausgeführt werden. Neuerdings werden auch liegende Dieselmotoren als Tandemmaschinen mit zwei Zylindern von 600—2000 kW und Zwillingstandemmaschinen mit vier Zylindern von 1200—4000 kW ausgeführt. Der Bau liegender Dieselmaschinen bietet konstruktive Schwierigkeiten bezüglich der dauernden Dichtigkeit der Kolben und der Brennstoffeinführung.

Der Platzbedarf und die Gebäudekosten eines Kraftwerkes für Dieselmotoren sind bedeutend geringer als bei einer Dampfanlage, da die Kessel- und Kondensationsanlagen fortfallen. Da der Dieselmotor innerhalb weniger Minuten angelassen werden kann, eignet er sich vorzüglich für die Deckung von Spitzenbelastungen.

für	Maschinen		Kraftstoff	
	übliche Größe in kW	minutliche Umdrehungszahl	mittlerer Heizwert	Verbrauch für 1 kWh
	4—15	200	—	880 l
Leuchtgas	15—75	180	5000 kcal/m³	750 „
	75—750	130	—	700 „
Kraftgas	15—75	180	—	0,7 kg
(Anthrazit)	75—750	130	7900 kcal/kg	0,55 „
Benzin	4—57	—	11 000 „	0,7—0,33 kg
Petroleum	4—25	—	10 750 „	0,7 kg
Spiritus	4—45	—	6000 „	0,64 „
Paraffinöl (Dieselmotor)				
stehend	20—750	250—150	10 000 „	0,34—0,26 kg
und liegend	600—4000	150—94	10 000 „	0,33 kg

(607) Wasserkraftmaschinen. Die Ausnutzung der natürlichen Kraftquelle, des Wassers, wird voraussichtlich die nächste Zukunft beherrschen. Für Kraftwerke kommen fast nur Turbinen in Frage. Man unterscheidet entsprechend der Durchflußrichtung des Wassers durch das Laufrad 1. Achsial-, 2. Zentripetal-, 3. Zentrifugal- und 4. Tangentialturbinen, und nach den Druckverhältnissen im Laufrad Druck- und Überdruckturbinen. Es gibt eine ganze Anzahl Abarten und Kombinationen dieser Turbinentypen. Von besonderer Bedeutung sind die Tangentialdruck- (Pelton- und Löffel-) und die Zentripetal-Überdruck-(Francis-)Turbinen. Die an der Turbinenwelle zur Verfügung stehende Leistung berechnet sich aus der Faustformel $7{,}5 \cdot Q \cdot H$ in kW bei einem Wirkungsgrad von 75% der Anlage. Die Leistung an den Klemmen des Stromerzeugers wird $N = \frac{1000 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \cdot \eta_1}{102}$ kW, wo η und η_1 den Wirkungsgrad der Turbine und des Stromerzeugers bedeuten. Durch geeignete Turbinen können Gefälle von 0,5 bis 500 m ausgenutzt werden.

Die Leistung der Turbinen wird durch Drosselung, durch Abdeckung der Leitkanäle oder noch besser durch Anwendung von Drehschaufeln, die die Querschnitte der Leitkanäle je nach der Leistung verändern, geregelt. Bei Drehschaufelregulierung erzielt man folgende Wirkungsgrade:

bei Langsamläufern 75—80%
bei Normalläufern 80—85%
bei Schnelläufern 70—80%.

Die Regulierung moderner Turbinen erfolgt durch automatische Regler, die bei Hochdruckturbinen mit Druckwasser, sonst mit Drucköl betrieben werden. Dieses wird bis max. auf 20 Atm gepreßt und betätigt durch geeignete Steuerorgane die eigentlichen Steuerkolben. Die Regler müssen mit einer beweglichen Rückführung ausgestattet sein, damit bei jeder Öffnung der Turbine die Regulierung von einer Nullage des Stellzeuges aus erfolgen kann. Die Änderung der normalen Umdrehungen kann durch Hand und durch einen kleinen sog. Servomotor von der Schaltbühne aus vorgenommen werden.

Anlage der Kraftwerke.

(608) Wahl des Grundstückes. Bei der Auswahl des Grundstückes für ein Kraftwerk sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

1. Das Grundstück muß mit Rücksicht auf Erweiterungsbauten und Nebenbaulichkeiten reichlich groß gewählt werden. Zu berücksichtigen sind dabei die Gründungsverhältnisse. Geeignet sind Felsboden, Gerölle, Kies, grobkörniger Sand, Mergel, fester Ton, feinkörniger Sand und trockener Lehm oder mittelfester Tonboden bei genügender Mächtigkeit und zuletzt weicher Ton- und feuchter, feinkörniger Sandboden. Boden unter 1 kg/cm^2 Tragfähigkeit ist zu vermeiden, andernfalls muß er künstlich befestigt werden. Das Grundstück soll ferner möglichst billig sein, dabei aber sich in zentraler Lage zum Versorgungsgebiet befinden. Bei Stadtwerken ist diese Bedingung vielfach nicht einzuhalten. Eine stark exzentrische Lage des Werkes verteuert die Kosten für die Verteilungsleitungen bedeutend. Eine sorgfältige Abwägung der gegensätzlichen Kosten ist in diesem Falle unbedingt notwendig.

2. Antriebsmaschinen. Bei Verwendung von Dampfmaschinen sind die gesetzlichen Bestimmungen für die Aufstellung von Kesselanlagen, bei Dampfturbinen außerdem die Belästigungen der Anlieger durch Geräusche zu berücksichtigen.

Diesel- und Gasmaschinen unterliegen weniger Beschränkungen, jedoch ist auch hierbei darauf zu achten, daß die Nachbarschaft nicht durch Geräusche (Fehlzündungen) oder Abgase belästigt wird. Bei Stadtzentralen ist für schallsichere Fundierung der Maschinen Sorge zu tragen.

3. Wasserbeschaffung. Diese ist oft von entscheidendem Einfluß besonders bei Dampfturbinenanlagen. Ein reichlicher, nach der Maschinenart zu berechnender Wasserzufluß von gleichbleibender Stärke ist Hauptbedingung. Bei Dampfanlagen ist auch die Eignung des Wassers zur Kesselspeisung zu untersuchen. Hat dieses mehr als 10 Härtegrade, so müssen besondere Wasserreiniger aufgestellt werden. Bei geringer Wasserergiebigkeit werden Rückkühlanlagen angewendet, die eine große Fläche in Anspruch nehmen.

4. Wasserabfluß. Dieser soll wenn möglich in ein Kanalisationssystem oder direkt in einen Fluß erfolgen. Bei stark ölhaltigem Wasser wird der Einbau von Ölabscheidern vorgeschrieben. Die Rückleitung des warmen Wassers, falls es nicht für Bade- oder Heizzwecke nutzbringend verwertet werden kann, erfolgt bei Flüssen unterhalb der Entnahmestelle.

5. Kohlenzufuhr. Der Transport der Kohlen soll möglichst billig sein, daher Anschlußgleis erstrebenswert. Anderenfalls sind besondere Transportbahnen mit selbsttätigen Kohlenkippern bzw. bei Flüssen Kohlenentladevorrichtungen nötig. Zur Förderung in die Kohlenbunker des Kesselhauses vom Lagerplatz aus wählt man Hängebahnen, Becher- und Bandwerke. Wägevorrichtungen für die angelieferten Kohlen sind ebenfalls notwendig.

Vorteilhaft ist es, wenn das Elektrizitätswerk in die Nähe des Gaswerkes gesetzt wird, dessen Einrichtungen zum Teil mitbenutzt und dessen Nebenprodukte oftmals günstig ausgenutzt werden können.

(609) Anordnung der Gebäude- und Maschinenanlagen. Die das Kraftwerk umfassenden Gebäude bestehen aus Maschinenhaus, Kesselhaus, Schalthaus, Werkstätten, Lagerräumen und Verwaltungsgebäuden bzw. Beamtenwohnhäusern. Die Gebäude sind möglichst auf die eine Seite des Grundstückes zu setzen, um später bei Erweiterungen in keiner Weise hinderlich zu sein. Je nach Größe und Art des Kraftwerkes sind für die genannten Räume eigene Gebäude zu erstellen, oder die einzelnen Räume zusammenzufassen. Bei Wasserkraft-, Diesel-, Leuchtgas- und Lokomobilanlagen fallen die Kesselräume naturgemäß fort. Für Sauggasanlagen sind außer den kleinen Kesselhäusern besondere Räume für die Gasreinigung vorzusehen. Die Längsachsen der Maschinen- und Kesselhäuser werden

bei Dampfmaschinenanlagen zweckmäßig parallel, bei Dampfturbinenanlagen meist senkrecht zueinander angeordnet. Hauptgewicht ist auf möglichst kurze Rohrleitungen zu legen. Die Werkstatt soll so liegen, daß der Transport der ausbesserungsbedürftigen Teile möglichst einfach und leicht erfolgen kann. Die Maschinenhäuser sind bis 2 m Höhe mit Kacheln oder Verblendsteinen, mit hellgestrichenen Wänden, reichlicher Anzahl von Fenstern und einer Decke ohne störende Resonanzwirkung zu versehen. Der Fußboden ist zweckmäßig mit geriffelten Fliesen zu belegen. Für gleichmäßige Beleuchtung ist zu sorgen. Fundamente sind möglichst aus (dunkelgestrichenem) Beton herzustellen. Türen und Kellertreppen sollen genügend breit sein, um Transporte zu erleichtern. Bei Kesselhäusern ist auf reichliche Belüftung unter Vermeidung von Zugluft zu achten. Der Bedienungsgang soll mindestens 3 m breit sein. Bei Wasserrohrkesseln ist darauf zu achten, daß der Raum hinter den Kesseln Platz zum Ausziehen der Rohre bietet; wenn dieses nicht möglich, müssen Fenster zu diesem Zwecke vorgesehen werden. Die Akkumulatorenbatterieräume müssen säurefesten, mit Gefälle verlegten und mit Ablaufrinnen versehenen Bodenbelag, reichliche Entlüftung, säurebeständigen Wandanstrich und Decken aus Beton erhalten. Die Gase dürfen nicht in Maschinen- oder Schalträume gelangen können. Kondensations- und Pumpenräume sollen keine Schmutzlöcher, sondern so gebaut sein, daß auch sie übersichtlich und leicht zu reinigen sind. Dampfleitungen sind sorgfältig zu isolieren (auch die Flanschen); Ausbildung als Ringleitung ist zweckmäßig. Die Dampfgeschwindigkeit ist möglichst hoch zu wählen.

(610) Gleichstrom-Kraftwerke. Der Gleichstrom besitzt bezüglich seiner Verwendbarkeit eine Anzahl von Vorzügen gegenüber dem Wechselstrom, ist aber in seinem Aktionsradius beschränkt. Auch die Möglichkeit der Akkumulierung ist ein nicht zu unterschätzender Vorzug. Er wird daher in den größeren Städten angewendet. Die Maschinensätze sind nach dem Charakter der Belastungen so zu bemessen, daß sie möglichst rationell ausgenutzt werden können. Für Spitzenbelastungen werden oft besondere, leicht anlaßbare Aggregate vorgesehen, sofern nicht die Batterie die Deckung übernehmen kann. Die Zahl der Zusatzaggregate ist tunlichst zu beschränken. Erreicht wird dieses dadurch, daß eine oder mehrere Hauptmaschinen für erhöhte Spannung gebaut sind. Ausgleichsaggregate lassen sich durch Aufstellung spannungsteilender Batterien (Kraftwerk und Unterstation) vermeiden. Zusatzmaschinen kann man bei Vorhandensein einer Pufferbatterie für die Straßenbahn umgehen, wenn man eine Hauptmaschine mit der gesamten Batterie zusammen auf besondere Sammelschienen für erhöhte Spannung schaltet. Da die Gleichstromwerke neuerdings vielfach Energie von Fernkraftwerken beziehen, haben die Motorgeneratoren, Einanker- und Kaskaden-Umformer sowie Großgleichrichter eine erhöhte Bedeutung gewonnen. Um in diesem Falle bei Störungen die notwendige Reserve zu haben, werden trotz der hohen Kosten nicht zu kleine Batterien mit kurzzeitiger Entladung aufgestellt. In der Batterie gehen zwar etwa 25% der eingeleiteten Energie verloren, es ist aber dabei zu berücksichtigen, daß nur ein geringer Bruchteil der vom Kraftwerk abgegebenen Energie auf Batteriestrom entfällt.

(611) Drehstrom-Kraftwerke. Zur Verteilung der elektrischen Energie auf große Gebiete und weite Entfernungen wird wegen der Möglichkeit, leicht hohe Spannungen zu erzeugen, der Wechselstrom, und zwar wegen seiner Vorteile für die Verteilung (631), (640) und der einfach zu bedienenden Motoren (743b), (746) in der Form des Drehstroms angewandt. Die Generatoren werden bis zu einer Spannung von 10000 V noch betriebssicher gebaut. Sie werden meistens mit den Antriebsmaschinen direkt gekuppelt. Für größere Werke ist besonders die Dampfturbine in Aufnahme gekommen. Es sind Maschinensätze bis 60000 kW Einzelleistung bereits ausgeführt worden. Derartige Sätze arbeiten jedoch nur dann wirtschaftlich, wenn eine genügend hohe Grundbelastung vorhanden ist. Bei Kraftwerken mit vorwiegend landwirtschaftlichem Absatzgebiet ist es vorteil-

haft, verschieden große Aggregate zu wählen, um die einzelnen Maschinen je nach den Betriebsverhältnissen günstig ausnutzen zu können. Mit Rücksicht auf die bei Drehstrom auftretenden Blindströme müssen die Generatoren nach der scheinbaren Leistung in kVA gewählt werden, während die Bestimmung der Antriebsmaschinen stets nach der wirklichen Leistung zu erfolgen hat. Für ein genügend großes Schwungmoment ist Sorge zu tragen. Man legt dieses in den Läufer oder verteilt es auf diesen und ein besonderes Schwungrad, um bei Ausbesserungsarbeiten am Läufer nicht zu schwere Werkstücke zu erhalten (Abb. 301, 302). Die Erregung der Generatoren geschieht durch Gleichstrom von 110 oder 220 V. Die Erregermaschinen werden entweder direkt auf die Hauptwelle des Generators gesetzt (Abb. 304) oder erhalten eigene kleine Antriebsmaschinen, wenn die Erregung zentralisiert ist. Als Reserve dienen Motorgeneratoren oder kleine Batterien. Um ein Parallelschalten von Drehstromgeneratoren zu ermöglichen, müssen gleiche Frequenz, Phasengleichheit, gleiche Spannung und gleiche Drehfeldrichtung an den zusammenzuschaltenden Maschinen vorhanden sein (468 u. folg.). Die Regulierung der Spannung erfolgt durch Hand oder bei größeren Werken durch Schnellregler (566 bis 569) oder Eilregler. Die gebräuchliche Frequenz der Drehstromgeneratoren für gemischten, d. h. Licht- und Kraftbetrieb, beträgt 50. Wechselstrombahnwerke arbeiten vielfach mit 25 Per/s. Die Wahl der Spannung richtet sich nach der Größe des Versorgungsgebietes und der Entfernungen. Die Umsetzung der Generatorspannung auf die Netzspannung erfolgt durch Transformatoren, die in besonderen, abschließbaren Kammern Aufstellung finden.

Die Kühlung der Generatoren erfolgt durch die im Ständer angeordneten Ventilationswege. Bei Dampfturbinenanlagen wird den Generatoren durch Filter gereinigte Luft zugeführt.

Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke.

(612) Betriebskosten der Kraftwerke. Die jährlichen Betriebskosten setzen sich zusammen aus:

1. veränderlichen Kosten, die von der jährlichen Stromerzeugung abhängig sind. Sie umschließen a) Kraftstoff, b) Schmier- und Putzmaterial, c) Wasserbeschaffung, d) Instandhaltung (Ausbesserungen), e) Löhne und Gehälter für das Betriebspersonal, f) allgemeine Unkosten (Steuern).
2. festen Kosten, die von der Größe des Werkes und des für die Anlage aufgewendeten Kapitals abhängig sind und zwar a) Gehälter für das Verwaltungspersonal, b) Abgaben, Versicherungen und sonstige Ausgaben, c) Tilgung (Amortisation), d) Erneuerung, e) Verzinsung.

Die unter 1 e genannten Ausgaben für Löhne und Gehälter sind eigentlich nur teilweise von der Jahresstromerzeugung direkt abhängig, da ein bestimmter Personalstand auch bei der schlechtesten Ausnutzung des Werkes vorhanden sein muß. Aus den unter 1 genannten Kosten errechnen sich die reinen Gestehungskosten. Treten hierzu die Kosten unter 2 a und b, so erhält man die wirklichen Gestehungskosten und unter Berücksichtigung der übrigen unter 2 genannten Ausgaben die Gesamtkosten der Stromerzeugung. Werke, deren Konzessionsdauer begrenzt ist, müssen das Kapital innerhalb der Konzessionsdauer tilgen. Es kann entweder das Aktien- oder das Anlagekapital getilgt werden. Letztere Form ist der Einfachheit und Gleichmäßigkeit wegen vorzuziehen. Die jährliche Tilgungsquote bestimmt sich aus der Formel $K \cdot p \cdot (1+p)^n / [(1+p)^n - 1]$, wo K = Anlagekapital, p = Zinssatz (3% = 0,03), n = Anzahl der Jahre bedeuten. Aber auch Werke mit unbegrenzter Konzessionsdauer und der Staat sehen oft eine bestimmte jährliche Tilgungsquote (0,5—1%) vor. Mit Rücksicht auf die Abnutzung der Anlageteile oder Neuerungen auf technischem Gebiet ist der Erneuerungsfond von besonderer Wichtigkeit. Hierfür wird jährlich ein bestimmter Prozentsatz der Anlagekosten dieser Teile von dem Gewinn abgeführt und zwar für

1. Gebäude	0,5— 1%	10. Kabelnetze	2%
2. Wasserwerksanlagen	0,5— 1%	11. Transformatoren	3— 5%
3. Dampfmaschinen, Turbinen	4— 5%	12. Holzmaste	8—10%
4. Kesselanlagen u. Rohrleitungen	5%	13. Eisen u. Betonmaste	4— 5%
5. Verbrennungsmaschinen	5%	14. Zähler	6%
6. Dynamomaschinen	4%	15. Oberleitungsmaterial f. Bahnen	2%
7. Schaltanlagen	4%	16. Gleismaterial f. Bahnen	1%
8. Akkumulatoren	6—10%	17. Werkzeug, Inventar	4—10%
9. Freileitungsnetze	2— 3%	18. Kraftwagen	10—20%

Durchschnittlich beträgt der dem Erneuerungsfond zuzuführende Betrag jährlich 1½—2% des Anlagekapitals.

Da die festen Kosten etwa ⅔ der jährlichen gesamten Betriebskosten ausmachen, ist es von größter Wichtigkeit und einschneidendem Einfluß, die Anlagekosten für 1 kW so niedrig wie möglich zu gestalten. Nach Dettmar betragen die mittleren Anlagekosten für 1 kW für Werke bis 1000 kW Leistung 1122—1312 M, von 1001 bis 5000 kW 1002 M und von 5001 und darüber 868—990 M. Dieselben Kosten betragen je nach der Antriebsart: für Wasser 1300 M, Dampf 1125 M, Verbrennungsmotoren 1330 M, Wasser und Dampf 1437 M für 1 kW Leistung.

(613) Betriebsführung und Statistik. Von der größten Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke ist eine gewissenhafte Betriebsführung und genaue Kontrolle der die Erzeugung beeinflussenden Faktoren. Die Kontrolle erstreckt sich auf die Erzeugung, die abgegebene Energie und die Auswertung des gesammelten Materials durch die Betriebsstatistik. Zur Überwachung der Erzeugung benutzt man je nach ihrer Art automatische Wagen, Gas- und Wassermesser, Rauchgasanalysatoren, Luftmengenmesser, Speisewassermesser, Dampfverbrauchsmesser, Kalorimeter, Indikatoren. Das Schmieröl ist dauernd auf Güte und Höhe des Verbrauches zu kontrollieren. Zeitweise sind kalorimetrische Untersuchungen der Kohle und Verdampfungsversuche an den Kesseln vorzunehmen. Auch der Wirkungsgrad des Betriebspersonals läßt sich durch durchdachte Anweisungen, gutes Handwerkszeug, geeignete maschinelle Vorrichtungen und dauernde genaue Kontrolle erhöhen. Die elektrischen Meßinstrumente wie Zähler, registrierende Volt-, Watt-, Phasenmesser und Thermometer gestatten eine bequeme Überwachung der erzeugten Energie und der dazu gehörenden elektrischen Maschinen und Apparate. Die Messung der für eigene Kraft- und Lichtzwecke verbrauchten Energie ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Wo Akkumulatoren vorhanden sind, sollte auf die genaue Messung der eingeleiteten und abgegebenen Energie nicht verzichtet werden. Die Angaben aller dieser Instrumente erhalten aber erst Wert, wenn sie systematisch und regelmäßig statistisch verwendet werden. Daher ist besondere Sorgfalt auf die Ausgestaltung und Ausarbeitung der monatlichen bzw. jährlichen Betriebsübersicht zu legen. Diese soll alle wirtschaftlichen und technischen Angaben des Werkes in übersichtlicher Form enthalten, so daß der Stand des Unternehmens und die Ausnutzung der Maschinen daraus klar ersichtlich ist.

(614) Ausnutzung der Kraftwerke. Diese wird charakterisiert durch Höhe, Verteilung und Dauer der Belastung. Eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Belastung ist durch eine überlegte Tarifpolitik anzustreben. Ein Bild von der Verteilung der Belastung erhält man durch die aus den stündlichen Zählerablesungen oder Notierungen der Leistung des Kraftwerkes gewonnenen Unterlagen. Meistens werden die Tage schwächster und stärkster Belastung zur Charakterisierung herangezogen. Ein genaueres Bild der tatsächlichen Verhältnisse erhält man nach dem Verfahren von Schendell, bei dem sämtliche stündlichen Belastungen während eines Monates in Tabellenform zusammengestellt, die

Höchst-, berechneten Mittel- und die Niedrigstwerte durch Farbstift kenntlich gemacht, herausgezogen und dann graphisch aufgetragen werden (Abb. 339 u. 340). Man gewinnt auf diese Weise Belastungskurven, bezogen auf die gleichen Stunden sowie die Tage des Monats und, wenn man diese Werte für alle Monate zusammen-

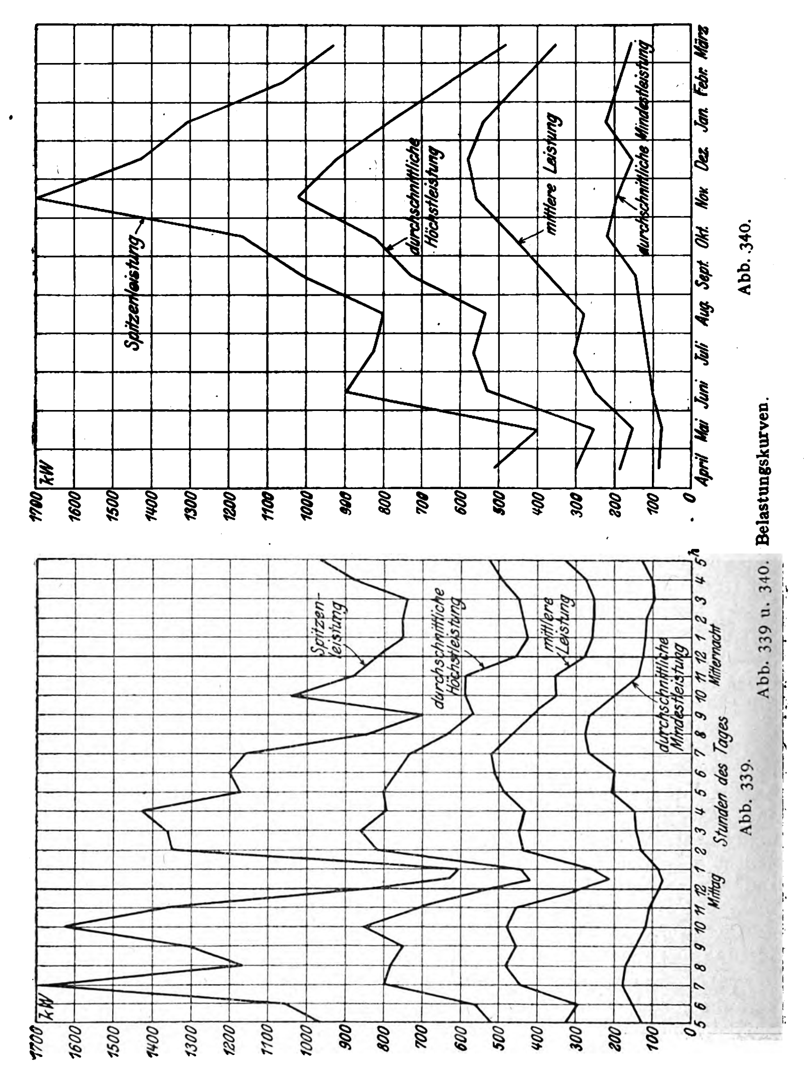


Abb. 340.

Abb. 339.

Abb. 339 u. 340. Belastungskurven.

faßt, neue Kurven bezogen auf die gleichen Stunden, gleichen Tage und die Monate des Jahres. Aus ihnen sind sämtliche für den Betrieb wichtigen Verhältnisse wie Ausnutzung der vorhandenen Maschinen, noch bestehende Anschlußmöglichkeiten inbezug auf Größe und zeitliche Verteilung, das Verhältnis der

Spitzenleistungen zu den mittleren Belastungen, Inanspruchnahme des Stauraumes bei Wasserkraftanlagen, Größe der erforderlichen Maschinenleistung für Spitzendeckung, des kleinsten Maschinensatzes für Niedrigstleistungen und die für einen bestimmten Zeitpunkt bereitzustellenden Maschinenleistungen zu entnehmen. Kraftwerke mit reiner Lichtbelastung weisen sehr ungünstige Belastungskurven auf. Günstiger liegen die Verhältnisse bei Werken mit Straßenbahn- und Kleingewerbeanschluß; noch günstiger bei Anschlüssen von Großindustriewerken. Den Mangel der schwachen nächtlichen Belastung sucht man durch den Anschluß eigener oder fremder Akkumulatorenbatterien, durch industrielle oder chemische Nachtbetriebe nach Möglichkeit zu beseitigen. Zur Beurteilung der Ausnutzung eines Kraftwerkes sind folgende Faktoren von Wichtigkeit:

1. Benutzungsziffer $= \dfrac{\text{Erzeugte kWh}}{\text{Spitzenleistung in kW}}$,

2. Belastungsfaktor $= \dfrac{\text{Benutzungsziffer}}{\text{Anzahl der Jahres-Betr.-Stunden}}$,

3. Ausnutzungsfaktor $= \dfrac{\text{Mittlere Belastung in kW}}{\text{vorh. Masch. Leistung}}$,

4. Betriebszeitfaktor $= \dfrac{\text{Maschinenbetriebsstunden}}{\text{Maschinenzahl} \times \text{Jahres-Betr.-Stunden}}$.

Bei Anschluß von Großabnehmern bedarf die Festlegung des Strompreises ganz besonderer Überlegung und Würdigung aller in Betracht kommenden Faktoren wie Höhe, Verteilung und Benutzungsziffer der neu hinzutretenden Belastung. Die verwendeten Selbstkostenformeln müssen eine angemessene Verteilung der veränderlichen Kosten auf die kWh, der festen Kosten auf die in Anspruch genommenen kW und die Benutzungsziffer berücksichtigen. Sind infolge des neuen Anschlusses Erweiterungen im Kraftwerk notwendig, so sind die Kosten anteilig dem neuen Stromabnehmer ebenfalls in Anrechnung zu bringen.

Literatur: W. Meyer, Die Bedeutung neuerer wirtschaftl.-techn. Erfahrungen u. Erfolge. ETZ 1911, S. 203. — Abnahmevers. a. e. 2500 PS.-Turbodynamo des E.-W. Erfurt. ETZ 1911, S. 395. — Klingenberg, Richtl. f. d. Bau groß. El.-W. mit Dampfbetrieb. ETZ 1912, S. 731. — Frey u. O. Albrecht, Das Kraftwerk Wyhlen. ETZ 1913, S. 1048. — E. Josse, Die gegenw. Entw. hochwert. Kondensationsanlagen. ETZ 1914 S. 581. — H. R. Trinkler, Kraftgaserzeug. b. gleichzeit. Gewinnung von Nebenprodukten. ETZ 1914, S. 672. — G. Klingenberg, Über d. Kraftbedarf d. Kondensationsanlagen. ETZ 1915 S. 197. — Techn. u. wirtsch. Erfahrung. im Dampfturbinenbetrieb. ETZ 1916, S. 23. — Die Statistik als Hilfsmittel f. Betriebsverwaltungen. ETZ 1916, S. 628. — G. Schendell, Belastungskurven von Kraftwerken. ETZ 1916, S. 381. — Norberg-Schulz, Elektr. Preise u. Wirtschaftl. der El.-W. ETZ 1916, S. 399. — D. Mohr, Wasserkraftwerk am Gandara in Spanien. Z. V. D. I. 1916, S. 381. — Fr. Münziger, Erfahrung. im Bau u. Betrieb hochbeanspruchter Dampfkessel. Z. V. D. I. 1916, S. 933. — B. Schäfer, Neue Umformeranlagen mit Großgleichrichtern. ETZ. 1917, S. 89. — Kollbohm, Die Kraftwerke des Kom. El.-W. Mark. ETZ 1917 S.157. — Die Dampfturbinen der Masch.-Fabr. Augsburg-Nürnberg. ETZ 1917, S. 220.— G. Styff, D. Phasenvergleich b. d. Parallelschaltung v. Wechselstrommaschinen. ETZ 1917, S. 461. — A. Graf, Neue Wasserturbinenanlagen in Deutschland. Z. V. D. I. 1917, S. 5. — O. Wirmer, Versuche z. Verbrennung von Koksgruß auf Unterwind-Wanderrosten. Z. V. D. I. 1917, S. 818. — Turbodynamo von 55 000 KW-Leistung. ETZ 1918, S. 188. — G. Klingenberg, Die Wirtschaftlichkeit von Nebenprodukten f. Kraftwerke. Z. V. D. I. 1918, S. 1. — H. R. Trinkler, D. Nebenproduktgewinnung aus Generatorgas, Z. V. D. I. 1918, S. 85. — Turbodynamo von 50 000 kW der AEG. Z. V. D. I. 1918, S. 335. — K. Neumann, Untersuchungen an der Dieselmaschine, Z. V. D. I. 1918, S. 763. — Bücher: F. Seufert, Anleitg. z. Durchführung v. Versuchen an Dampfmasch., Kesseln, Dampfturbinen u. Dieselmotoren. Verl. Jul. Springer, Berlin. — St. Löffler, u. A. Riedler, Ölmaschinen. Verl. Jul. Springer. — G. Liekfeld, Petroleum- u. Benzinmotoren m. bes. Berücks. d. Treibölmotoren. Verl. R. Oldenbourg, München. — H. Güldner, Entw. u. Berechn. d. Verbrennungs-Kraftmasch. u. Kraftgasanlagen. Verl. Jul. Springer. — F. Barth, Wahl, Projekt. u. Betr. v. Kraftanlagen. Verl. Jul. Springer. — O. Marr, D. neueren Kraftmasch., ihre Kosten u. Verwendung. Verl. R. Oldenbourg. — J. Stumpf, Gleichstrom-Dampfmasch. Verl. R. Oldenbourg. — Ludin, Die Wasserkräfte. Verl. Jul. Springer — Stodola, Die Dampfturbinen. Verl. Jul. Springer. — G. Klingenberg, Bau großer Elektr.-Werke. Verl. Jul. Springer. — M. Berthold, Verwaltungspraxis bei El.-W. u. el. Straßenbahnen. Verl. Jul. Springer. — Fleig, Stromtarife f. Großabnehmer. Verl. Jul. Springer.

Geschäftliche Bedingungen der Stromlieferung.

(615) Stromlieferungsverträge. Die Beziehungen zwischen dem EW und dessen Stromabnehmern sind in den meisten Fällen durch allgemeine, für fast alle Abnehmer gleichlautende „Bedingungen" oder „Satzungen" geregelt. Die Abnehmer haben bei ihrer Anmeldung zum Anschluß und Strombezug durch in doppelter Ausfertigung einzureichende Vordrucke, welche über Umfang und Art der mit elektrischer Arbeit zu versorgenden Anlagen Aufschluß geben, die allgemeinen Bedingungen als für sie bindend anzuerkennen. Diese sollen enthalten: Angaben über die Stromart, die Höhe der zu liefernden Durchschnittsspannung, über Art, Ausführung und Kosten der Hausanschlüsse einschließlich Stellung der Zähler, ferner Bestimmungen über die Herstellung, Prüfung und Überwachung der Inneneinrichtungen. Aufzunehmen sind ferner die Rechte des EW bei Mißbrauch oder Diebstahl elektrischer Arbeit, bei unrichtigem Gang und der allenfalls notwendigen Prüfung der Zähler, bei Störungen und Unfällen und als wichtigstes selbstverständlich die verschiedenen Gebühren für den Strombezug, für Benützung von Zählern oder sonstigen Meßapparaten, Transformatoren, selbsttätigen Schaltapparaten (Sperrschaltern und Treppenschaltuhren, worüber Näheres unter Tarifen (621)) schließlich noch die Zahlungsbedingungen. Infolge der im Kriege außerordentlich gestiegenen Kohlenpreise werden überall Kohlenklauseln eingeführt, welche für alle Abnehmer, oder doch wenigstens für die Großabnehmer eine bestimmte Erhöhung des Preises für 1 kWh für jede Mark, um die der Preis von 1 t Kohle steigt, vorsehen.

Empfehlenswert ist es, in dem Vertrag ein Verbot der Stromabgabe gegen Entgelt an Dritte vorzusehen, damit die Besitzer großer Häuser nicht als Großabnehmer zu niedrigen Gebühren Strom beziehen und zum Schaden des Werkes an ihre Mieter weiter verkaufen. Zur Gewährleistung eines geordneten Betriebes einer regelmäßigen Stromlieferung, ferner zur Sicherung der Ansprüche des Werkes sind noch Maßnahmen aufzunehmen, die zur sofortigen Stromentziehung in bestimmten Fällen berechtigen.

Im übrigen aber sollen die Bezugsbedingungen nicht kleinlich und engherzig sein, sondern von kaufmännisch-wirtschaftlichem Geist getragen werden; sie müssen daher auch den berechtigten Forderungen der Abnehmer entsprechen. Ist dies der Fall, dann wird auch stets bezüglich des Anwachsens der Abnehmerzahl und der Einnahmen eine lebhafte Entwicklung zu verzeichnen sein. Wichtig ist in dieser Beziehung ein möglichst großes Entgegenkommen bei der Herstellung der

(616) Hausanschlüsse, welche fast stets von den Werken selbst ausgeführt werden. Wenn die Anschlüsse, was bei den heutigen hohen Materialpreisen und Löhnen erklärlich, nicht kostenlos hergestellt werden können, so sollten zur teilweisen Deckung der entstehenden Selbstkosten nur Einheitsgebühren, die höchstens nach der Größe der Anschlüsse abgestuft sind, erhoben werden, um zu vermeiden, daß die nicht durch ihr Verschulden zum vorhandenen Leitungsnetz ungünstiger liegenden Abnehmer höhere Anschlußkosten bezahlen müssen. Entstehen in besonderen Fällen, namentlich bei Großabnehmern infolge Erweiterung des Leitungsnetzes erheblichere Anschlußkosten, dann wird man diese, soweit solche vom Abnehmer getragen werden sollen, entweder auf mehrere Jahre verteilen (wohl auch für Transformatoren dauernde jährliche Gebühren erheben) oder in die meist hierbei zu vereinbarenden Strompreise mit einschließen, wobei gewöhnlich auch der Bezug jährlicher Mindeststrommengen auf längere Zeit gewährleistet werden muß. Die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit einer größeren Leitungsnetzerweiterung erfolgt zuweilen auch dadurch, daß zu den entstehenden Kosten der oder die Abnehmer solange einen entsprechenden Betrag zinslos zu Verfügung stellen, bis durch den Strombezug aller an der Erweiterungsstrecke liegenden Anlagen eine bestimmte für die Wirtschaftlichkeit notwendige Reineinnahme erzielt wird.

(617) Inneneinrichtungen. Werden die Leitungen von den Hausanschlüssen bis zu den Zählern, wenn solche im Untergeschoß oder Erdgeschoß vereinigt unter-



gebracht werden, meist noch von den Werken selbst hergestellt, so ist andererseits die Ausführung der hinter den Zählern liegenden Inneneinrichtungen auf Grund der Stromlieferungsbedingungen dem Wettbewerb zugelassener Unternehmer freigegeben. Solches ist auch dringend notwendig, denn die noch vereinzelt bestehenden Vorrechte von EW für die Herstellung der Anschlußanlagen, und seien es auch nur versteckte Monopole (in Form von hohen Prüfungs- und Anschlußgebühren für die von anderer Seite ausgeführten Anlagen) bilden wegen des hierdurch gespannten Verhältnisses zwischen Installateuren und Werk ein starkes Hemmnis für die Entwicklung der Werke. Die Erhebung von Gebühren für Prüfung der seitens der Unternehmer einzureichenden Entwürfe, ferner für Prüfung, Abnahme und Anschluß der fertigen Anlagen sollte überhaupt gänzlich in Fortfall kommen, da hierdurch die Abnehmer nur verärgert werden und oft aus diesem Grunde von der Einführung elektrischer Beleuchtung ganz absehen. Im Gegenteil sollte man, wie dies seitens der Gaswerke schon seit langen Jahren, namentlich für die Gasselbstmesseranlagen geschieht, die Errichtung von Innenanlagen durch Übernahme eines Teiles oder der gesamten Herstellungskosten den Abnehmern entgegenkommen. Derartige Erleichterungen sind auch in den letzten 10 Jahren, besonders in den Kriegsjahren, mit außerordentlich gutem Erfolg bei einer ganzen Reihe von Werken eingeführt worden. Die Art des Entgegenkommens ist hier sehr verschieden; man kann nach Klein, Offenbach (Mitt. Ver. EW 1915, Nr. 171, S. 391) folgende Hauptsysteme unterscheiden:

1. Leihsystem. Die Anlage wird auf Kosten des Werkes erstellt und bleibt dauernd dessen Eigentum; sie steht dem Stromabnehmer zur vertraglichen Benützung unentgeltlich zur Verfügung. Ein späterer käuflicher Erwerb ist zuweilen zulässig.

2. Mietsystem. Einrichtung wie unter 1, nur wird wie bei einer Wohnung eine monatlich oder vierteljährlich zu zahlende Miete erhoben oder zuweilen solche durch einen Zuschlag zum Strompreis in Ansatz gebracht. Auch hier ist käuflicher Erwerb unter bestimmten Bedingungen möglich.

3. Teilzahlungssystem. Die Anlage wird vom Werke erstellt, die Kosten werden durch Hausbesitzer oder Abnehmer in Teilzahlungen getilgt, worauf die Anlage in deren Besitz übergeht. Frühere Ablösung durch sofortige Zahlung der restlichen Raten auf Wunsch möglich.

4. Beisteuersystem. Die Anlage wird vom Benützer oder Hauswirt bezahlt. Das Werk leistet zu den Kosten meist einmalige bare Zuschüsse nach der Größe der Anlagen, die zuweilen in Raten zurückbezahlt werden, oder durch Gewährung kostenloser Hausanschlüsse oder Steigleitungen, schließlich auch noch durch Abgabe kostenlosen Stromes meist auf 1 Jahr. Im letzteren Falle sind gewöhnlich die Abnehmer zu längerem Strombezug auf eine Reihe von Jahren verpflichtet.

5. Freiinstallationssystem. Das Werk erstellt auf seine Kosten die ganze Anlage und hält sich meist schadlos durch einen höheren Strompreis. Sehr oft sind derartige Anlagen mit Münzmessern versehen.

6. Gemischtes System. Durch Vereinigung zweier oder mehrerer vorgenannter Systeme werden neue Formen von Erleichterungen geschaffen. Die meiste Verbreitung haben die Teilzahlungs- und Beisteuersysteme gefunden; bei letzteren ist die Gewährung der Beisteuer in Form kostenlosen Stromes seltener, jedoch mit glänzendem Erfolg in Gotenburg (Schweden) eingeführt. Häufiger vertreten ist auch noch das Mietsystem, während das Leihsystem und das Freiinstallationssystem nur in wenigen Fällen anzutreffen ist.

(618) Zählergebühren (Miete). Die durch Verzinsung, Abschreibung, Unterhalt und Ablesung der Zähler den Werken entstehenden Unkosten können nicht allein durch die Zählermiete Deckung finden, sondern müssen zum Teil in die Strompreise mit eingerechnet werden, damit sie gegenüber den Mieten für Gasmesser, für die sogar nicht selten gar keine Mietgebühr erhoben wird, nicht zu sehr abweichen. Man findet zuweilen die Anschauung vertreten, daß die Messung von Gas, Elektrizität, Wasser usw. ebenso kostenlos erfolgen müsse, wie die Mes-

sung oder Wägung irgendwelcher Stoffe (Petroleum, Kohlen, Holz oder dgl.) durch den Kaufmann gesetzlich ohne Berechnung irgendwelcher Gebühren für die Benützung der Meß- oder Wiegeeinrichtungen zu erfolgen hat. Man vergißt aber hierbei, daß diese Einrichtungen dem Kaufmann in seinem Verkaufsraum für jeden Abnehmer zur Verfügung stehen, während beim Verkauf von Gas, Wasser oder Elektrizität umgekehrt jedem Abnehmer eine besondere Meßeinrichtung dauernd bereit gestellt werden muß. Wenn dabei noch berücksichtigt wird, daß einerseits die Anschaffungskosten der Zähler zurzeit sehr hoch sind, andererseits aber der Stromverbrauch in kleinen Anlagen mit schwacher Ausnützung außerordentlich gering ist und daher die Roheinnahme hierfür in gar keinem Verhältnis steht zu dem auf die Zähler Bezug habenden Betriebskosten, so ist klar, daß die Erhebung einer, wenn auch nur mäßigen Zählermiete nicht nur berechtigt, sondern sogar dringend notwendig ist. Das vorstehend über die Zähler Gesagte gilt selbstverständlich in gleichem Maße auch für andere den Zwecken der Strommessung oder der Beschränkung freier Stromverwendung dienender mietweise abzugebenden Apparate, wie Strombegrenzer, Sperrschalter, Schaltuhren für selbsttätige Treppenbeleuchtung. Für Strombegrenzer wurden wohl bisher in Rücksicht auf die geringen Anschaffungskosten Mietgebühren nicht erhoben, weil auch naturgemäß bei Verrechnung nach Pauschaltarif die Apparategebühr leicht in die für Stromlieferung zu leistenden festen Kosten einbezogen werden kann. Für Treppenschaltuhren und andere Sperrschaltereinrichtungen, die eine Stromentnahme nur zu bestimmten Stunden gestatten und größere Anlagekosten bedingen, wird aber eine Mietgebühr nicht zu entbehren sein.

(619) Strompreise (Tarife). Der wichtigste Teil der Stromlieferungsbedingungen sind die Strompreise. Dieselben müssen den Forderungen der äußerst verschiedenen Abnehmer nach Möglichkeit angepaßt werden. In Rücksicht auf möglichst einfache Verrechnung und des leichten Verständnisses wegen wäre ein Einheitspreis (für die Kilowattstunde), wie solcher neuerdings vielfach für das Kubikmeter Gas eingeführt worden ist, sehr zu begrüßen. Das ist aber unmöglich, weil elektrische Arbeit nicht so leicht wie Gas aufgespeichert werden kann. Es ist also für die Wirtschaftlichkeit des Werkes notwendig, zu berücksichtigen, daß die Einrichtungen für die Erzeugung, Fortleitung und Verteilung des Stromes während eines möglichst großen Teiles des Jahres voll ausgenützt werden. Dieser Forderung steht entgegen die verhältnismäßig geringe Ausnützung fast aller Lichtanlagen, weshalb für diese, bezogen auf den für eine volle Jahresausnützung sich berechnenden Einheitspreis, ein verhältnismäßig viel höherer Kilowattstundenpreis erhoben werden muß. Andererseits muß bei Anschluß großer Licht- und Kraftanlagen der Gestehungskostenpreis durch eigene Stromerzeugung für die Festsetzung der Grundpreise und Nachlässe entsprechend berücksichtigt werden. Für gut ausgenützte Kraftanlagen können niedrigere Preise eingeräumt werden, insbesondere für den Verbrauch, der in die hellen Tagesstunden (namentlich im Sommer) oder in die eigentlichen Nachtstunden fällt, zu welcher Zeit nur eine geringe Inanspruchnahme der Werke stattfindet. Lediglich die gleichzeitige Ausnützung der Licht- und Kraftanlagen in den Abendstunden im Winter beeinflußt die Wirtschaftlichkeit eines Werkes ganz bedeutend, eine Tatsache, welche auch zur Einführung der Doppeltarife mit hohem Preis in den Abendstunden Veranlassung gab, um hierdurch die Einschaltung aller zu dieser Zeit nicht unbedingt notwendigen Verbraucher zu vermeiden und die Besitzer der Kraftanlagen dazu anzuhalten, ihre Arbeitszeiten mehr diesen Tarifen anzupassen. Es ist hiernach klar, daß bei Wahrung der Wirtschaftlichkeit der Werke nur durch das Vorhandensein mehrerer Tarife den Forderungen der Allgemeinheit Rechnung getragen werden kann. Bei deren Aufstellung muß oberster Grundsatz sein erstens, daß sie dem Abnehmer einen Anreiz zum Stromverbrauch in der für die Werke stillen Zeit bieten, so daß der Abnehmer nach weiterer Verwendung elektrischer Arbeit in seinem Betrieb sucht, und zweitens, daß die festen Kosten (für Verzinsung, Tilgung usw.) am ge-

ringsten werden, wenn die Benützungsdauer des Jahresmaximums auf eine möglichst große Stundenzahl gebracht werden kann. Dem Abnehmer muß also die Wahl zwischen mehreren Tarifen, welche seinen Zwecken am besten entsprechen, gelassen werden, wenn hierdurch auch die Buchführung etwas erschwert wird. Die Anzahl der Tarife soll aber nicht zu groß sein, um den Abnehmer nicht zu verwirren oder mißtrauisch zu machen. Für besonders auftretende Fälle, wo keiner der vorhandenen Tarife geeignet ist, müssen die Direktoren der Werke oder mindestens die dafür ernannten Ausschüsse bei den städtischen Werken oder die Aufsichtsräte bei den Privatwerken befugt sein, Sonderverträge abzuschließen, wenn das EW nicht auf diesen oder jenen Abnehmer verzichten will, der trotz gewährter außergewöhnlich günstiger Bedingungen doch meist einen nicht unerheblichen Vorteil bringt.

Man hat bei den Stadtverwaltungen, die in dieser Beziehung oft noch recht rückständig waren, in den letzten Jahren mehr und mehr eingesehen, daß solche Ausnahmen gewährt werden müssen, wenn die Städte solche gewerblichen Betriebe wie Gaswerke und EW in kaufmännischem Geist betreiben und verwalten wollen, und daß in allen derartigen Fällen nicht erst viel Zeit beanspruchende Beschlüsse der Gesamtverwaltungen herbeigeführt werden können, vielmehr schnell durch eine oder doch nur wenige Personen gehandelt werden muß.

Man unterscheidet drei Hauptformen von Tarifen, nämlich

1. Zählertarife, die nur von der Zahl der verbrauchten Kilowattstunden ausgehen,

2. Pauschaltarife, die die Zahl der verbrauchten Kilowattstunden völlig oder nahezu unberücksichtigt lassen und nur die höchst beanspruchte Leistung in Kilowatt zur Zahlungsgrundlage nehmen,

3. Gemischte Tarife, die als eine Vereinigung der beiden vorgenannten Tarife anzusprechen sind und daher neben einer sogenannten Grundgebühr für die höchst beanspruchte Leistung auch noch eine Bezahlung für jede bezogene Kilowattstunde bedingen.

Bei den Zählertarifen und gemischten Tarifen werden meist noch Nachlässe verschiedener Art gewährt, die als Grundlage entweder die Zahl der bezogenen Kilowattstunden oder die der Benützungsstunden der angeschlossenen Anlagen, zuweilen auch beides, berücksichtigen.

(620) Die Zählertarife sind zweifellos die verbreitetsten, und wenn sie für die verschiedenen Verhältnisse richtig bemessen sind, auch die gerechtesten, vielleicht mit Ausnahme einiger besonderer Fälle, wie bei sogenannten Reklamebeleuchtungen, die nur vor Weihnachten einige Wochen in Betrieb sind und für welche ein außergewöhnlich hoher Preis gefordert werden müßte, wenn man, wie durch die vorhergehenden Ausführungen dargelegt, die gesamten Selbstkosten (einschließlich fester Kosten) für die Stromlieferung an solche Anlagen berücksichtigt. Bei den Zählertarifen unterscheidet man nun wieder solche, die den Strompreis nach dem Verwendungszweck oder nach der Bezugszeit verschieden bemessen.

A. Tarif nach Verwendungszweck. Für Licht- und Kraftzwecke werden verschiedene Grundpreise für die Kilowattstunde gefordert, wobei ersterer das 2—3fache des letzteren beträgt. (Vor Kriegsbeginn für Licht 40 bis 60 Pf, für Kraft 12—25 Pf. Diese Preise sind jetzt durch die Kriegsverhältnisse um ein mehrfaches erhöht.) Auf die Grundpreise werden meist stufenweise Nachlässe gewährt, die entweder mit den monatlichen oder jährlichen Verbrauchsmengen oder mit der Zahl der jährlichen Ausnützungsstunden steigen. Zuweilen werden die Nachlässe auch für beide Fälle gewährt. Die Grundpreise sinken hierdurch um 50—60%. Besonders günstige Einheitspreise werden für Straßenbahnen, Straßenbeleuchtungen, Bahnhofsbeleuchtungen sowie auch für Treppenbeleuchtungen wegen der hierbei feststehenden hohen Ausnützungszeit eingeräumt.

B. Tarif nach Bezugszeit. Bei diesem wird ohne Beachtung des Verwendungszweckes zur Zeit der höheren Inanspruchnahme der Werke (meist Abendstunden im Winter) ein hoher Grundpreis für die Kilowattstunde berechnet,

der unter Berücksichtigung aller bestehenden Betriebsausgaben aufzustellen ist, während für die übrige Zeit ein niederer Preis, ausreichend zur Deckung der unmittelbaren Betriebsausgaben, und meist nur die Hälfte bis ein Drittel des hohen Preises betragend, verlangt wird. Auf diese Grundpreise werden wieder auf Verbrauchs- oder Ausnützungsstunden Nachlässe staffelförmig je nach der Höhe bis 50% und mehr gewährt. Bei dieser Tarifart müssen die Zähler zwei Zählwerke erhalten, die abwechselnd durch eine Uhr zu bestimmten Zeiten eingeschaltet werden. Die Uhr wird entweder mit dem Zähler zu einem Apparat fest verbunden, oder auch von diesem getrennt aufgestellt. Die letztere Anordnung ist verbreiteter und empfehlenswerter, weil sie die Verwendung nur einer Uhr für alle in einem Gebäude aufgestellten Doppeltarifzähler gestattet, wodurch an Anlagekosten erheblich gespart werden kann. Die sogenannten Sperrzeiten (Zeiten für hohen Preis) beginnen in der Regel mit Eintritt der Dunkelheit, endigen aber verschieden (8—10 Uhr abends). Auch werden für Licht- und Kraftanlagen oft zweierlei Sperrzeiten festgesetzt. Der Doppeltarif hat große Verbreitung gefunden und wird namentlich da angewandt, wo die Erweiterung der Stromerzeugungsanlagen oder die Verstärkung der Leitungsnetze außergewöhnlich hohe Kosten bedingen würde.

Eine Art Doppeltarif ist auch derjenige, bei welchem ein Benützungsdauernachlaß dergestalt gewährt wird, daß zunächst ein höherer Preis solange berechnet wird, bis die Verzinsungs- und Tilgungskosten für die maximal beanspruchte Leistung gedeckt worden sind. Hierfür wird in der Regel eine Benützungsdauer von jährlich 300—400 Stunden zugrunde gelegt; alle weiteren Benützungsstunden werden mit einem ganz niederen Preis zur Deckung der entstehenden reinen Betriebskosten berechnet. Beispiel: Für die ersten 400 Benützungsstunden 50 Pf. für 1 kWh, alle weiteren Stunden 10—4 Pf.

Die von W r i g h t zuerst angegebene und mancherlei Abweichungen bei den verschiedenen Werken zeigende Tarifart erfordert keine zwei Zählwerke und keine Uhr, dagegen einen sogenannten Maximumzeiger, der die höchste viertelstündig dauernde Höchstbeanspruchung anzeigt.

(621) Pauschaltarife. Diese Tarifart wurde früher wegen der hohen Preise für Zähler ziemlich häufig angewandt und bestand darin, daß für jede angeschlossene Lampe und jeden angeschlossenen Motor eine feste, meist monatlich zu zahlende Gebühr für Stromverbrauch erhoben wurde, die öfters noch nach der voraussichtlichen Jahresbenützungsdauer abgestuft war. Durch die Herstellung billiger und sehr zuverlässiger Zähler wurde die Anwendung von Pauschaltarifen im Laufe der Jahre außerordentlich eingeschränkt und meist nur noch von Werken, welche mit Wasserkraft arbeiten, in größerem Maß beibehalten.

Eine Belebung erfuhren die Pauschaltarife in neuerer Zeit durch die Einführung der S t r o m b e g r e n z e r, d. s. Apparate, welche bei Überschreitung einer bestimmten, verschieden hoch einstellbaren Belastungsgrenze (Stromstärke) den Strom in raschem Wechsel ein- und ausschalten, wodurch für die angeschlossenen Lampen ein für die Augen unerträgliches Flackern des Lichtes entsteht. Diese Erscheinung dauert solange, bis durch Ausschalten von Lampen oder sonstigen Stromverbrauchern die Stromstärke auf oder unter die eingestellte Belastungsgrenze sinkt. Pauschaltarife unter Verwendung solcher Strombegrenzer wurden in den letzten Jahren von einer Reihe von EW wegen der gegen Zähler nur etwa die Hälfte bis ein Drittel betragenden Anschaffungskosten warm empfohlen und aus diesem Grunde in größerem Maße für kleine Abnehmer eingeführt. Als Vorteile wurden hierbei genannt außer der infolge geringerer Anschaffungskosten, auch für Verzinsung und Abschreibung entstehenden geringeren Kosten, der Fortfall der monatlichen Ablesung der Zählerstände, geringere Unterhaltungskosten gegenüber Zählern, bessere Ausnützung der pauschalierten Strommengen für die verschiedenen Verwendungszwecke, Einzug gleichmäßig hoher Monatsbeträge, welche dem Abnehmer vorher bekannt sind, wodurch Beanstandungen fortfallen und Buchführung und Geldeinzug ganz wesentlich vereinfacht wird. Diesen gewiß nicht zu verkennenden Vorteilen stehen jedoch schwerwiegende

Nachteile gegenüber. Bei Pauschaltarifen ohne Strombegrenzer wird das EW nicht selten dadurch betrogen werden, daß die Abnehmer statt der vereinbarten kleineren Lampengrößen Lampen mit wesentlich größerer Leuchtkraft verwenden. Bei Verwendung von Strombegrenzern wird dieser Übelstand zwar beseitigt, andere Mängel dagegen hierdurch herbeigeführt; so beispielsweise, daß der Abnehmer eine verhältnismäßig hohe Stromstärke vereinbaren muß, wenn er der äußerst selten in seiner Anlage auftretenden Höchstbelastung Rechnung tragen will, oder er muß sich in der Einrichtung seiner Beleuchtung für Nebenräume einen außerordentlichen Zwang auferlegen, wodurch gerade die Vorteile der elektrischen Beleuchtung nach dieser Richtung gänzlich aufgehoben werden. Auch der Anschluß anderer für den Haushalt heute bereits in größtem Umfang eingeführter Gebrauchsgegenstände mit verhältnismäßig geringer Benützungsdauer, wie namentlich Bügeleisen, ist bei Pauschaltarifen für den Abnehmer äußerst ungünstig, da der Stromverbrauch solcher Gegenstände nicht unerheblich ist und die alsdann zu zahlenden Jahreskosten unverhältnismäßig hoch werden. Der Hauptfehler jeden Pauschaltarifs ist jedoch, daß er äußerst ungerecht ist und daß der in sparsamster Weise bei der Einschaltung seiner Verbrauchsapparate verfahrende Abnehmer, auf die bezogene Kilowattstunde berechnet, oft den vier- bis fünffachen Preis hierfür bezahlen muß wie ein anderer Abnehmer, welcher die Benützung seiner Lampen und sonstigen Stromverbraucher bis zur höchsten Verschwendung treibt. Aus diesen Gründen haben sich viele erfahrene Leiter großer Werke gegen diesen unsozialen Tarif ausgesprochen. Unter den heutigen, durch den verlorenen Krieg für uns eingetretenen Verhältnissen, wird man wohl sogar die weitere Verwendung von Pauschaltarifen wegen der für uns so dringend notwendigen Ersparnis von Brennstoffen bei allen nicht mit Wasserkraft arbeitenden Werken verbieten müssen.

Eine besondere Art von Pauschaltarif für Beleuchtung ist die Festsetzung fester Jahresgebühren für die in Treppenhäusern eingerichteten Lampen mit selbsttätiger Ein- und Ausschaltung. Hierzu bedient man sich der Schaltuhren, die bei Beginn der Dunkelheit die Beleuchtung einschalten und zu einer bestimmten einstellbaren Stunde, 8, 9 oder 10 Uhr abends die Lampen ausschalten. Neben dieser, durch die Uhr selbsttätig erfolgenden Dauerbeleuchtung ist auch noch durch die beim Hauseingang und in jedem Stockwerk einzurichtenden Drucktaster eine wiederum von der Uhr beeinflußte Zeiteinschaltung, auf die Dauer von 3—5 Minuten möglich. Bei diesem Pauschaltarif ist die Benützungsdauer begrenzt und abgesehen von der geringen Benützung der Zeiteinschaltung im voraus festgelegt, und da stets alle Lampen gleichzeitig brennen, ist der Stromverbrauch annähernd genau zu bestimmen, wenn durch den Einbau von besonderen Fassungen und Glühlampen mit dazu passenden Sockeln die Verwendung von Lampen größerer Leuchtkraft möglichst ausgeschlossen wird und die zugelassenen Lampen durch das Werk selbst geliefert werden.

Diese sehr verbreiteten Treppenschaltuhren haben in den letzten Jahren durch den Einbau einer astronomischen Zeiteinstellung eine wesentliche Verbesserung erfahren, so daß die durch den verschiedenen Zeiteintritt der Dunkelheit etwa alle Monate zweimal notwendige Einstellung der Einschaltungszeit selbsttätig durch die Uhr erfolgt. Neben der meist in vierteljährigen Teilzahlungen zu erlegenden Jahresgebühr für jede eingerichtete Treppenlampe wird noch eine Gebühr für die Benützung der aufzustellenden Schaltuhr erhoben.

(622) Gemischte oder Grundtaxentarife. Diese berücksichtigen den Standpunkt, daß durch die für die bezogene Höchstleistung in Kilowatt zu bezahlende Gebühr vor allen Dingen die festen Betriebsausgaben des EW gedeckt werden müssen und alsdann für die bezogenen Kilowattstunden noch ein Preis gefordert wird, der unter Berücksichtigung eines angemessenen Nutzens die reinen beweglichen Betriebsausgaben der Stromerzeugungsanlagen ersetzt.

Eine derartige Berechnung ist zweifellos die gerechteste und richtigste, weil sie sich am besten den Selbstkosten anpassen läßt. Es haftet ihr weder der Mangel des

Zählertarifes an, welcher bei geringem Stromverbrauch einen viel zu geringen Preis fordert, noch enthält sie den Fehler des Pauschaltarifs, der die Höhe des Verbrauchs unberücksichtigt läßt und infolgedessen den Abnehmer oder das Werk schädigt.

In früheren Jahren wurde diese Tarifart meist nur für größere, gewerbliche oder industrielle Anlagen derart angewandt, daß durch den Einbau von Höchstverbrauchsmessern die eine Viertelstunde dauernde Jahreshöchstleistung in Kilowatt festgestellt wurde und letztere zu dem vertraglich für das Kilowatt Leistung vereinbarten Einheitspreis zur Verrechnung gelangte, für die verbrauchten Strommengen aber ein niedriger Kilowattstundenpreis meist noch mit Verbrauchs- oder Benützungsdauernachlaß berechnet wurde; zuweilen war zur Vermeidung der besonderen Meßvorrichtungen (Höchstleistungszeiger) wohl auch der Anschlußwert der Anlagen für die Berechnung der Grundgebühren als maßgebend festgelegt.

Derart gemischte Tarife haben sich in den letzten Jahren auch für Beleuchtungsanlagen kleineren Umfangs eingeführt, indem hier die Grundgebühr nicht nach der Höchstleistung, sondern nach der Zahl der angeschlossenen Lampen oder der eingerichteten Zimmer berechnet wird wie bei dem sog. „Potsdamer Tarif", oder für die Bodenfläche der zu beleuchtenden Räume für jedes Quadratmeter eine entsprechend geringe Grundgebühr neben der Kilowattstundengebühr entrichtet werden muß. Letztere Berechnungsart ist beispielsweise in Berlin eingeführt.

Zu den gemischten Tarifen gehört auch der erst in späterer Zeit eingeführte „Überverbrauchstarif". Dieser verlangt einen sogenannten Spitzenzähler, der auf eine bestimmte Höchstleistung, für welche die Grundgebühr zu zahlen ist, eingestellt wird. Der Zähler zeigt aber die innerhalb dieser Höchstleistung auftretende Verbrauchsmenge nicht an, sondern nur bei deren Überschreitung die überschießenden Kilowattstunden, welche dann meist mit einem erhöhten Preis zur Verrechnung gelangen.

Ein weiterer gemischter Tarif ist auch der von Jung 1900 in Halle mit gutem Erfolg eingeführte Zeitzählertarif, bei welchem der Kilowattstundenzähler mit einem Zeitzähler, der erst bei einer bestimmten Leistung anspricht, in Verbindung gebracht wird. Die Einstellung dieser Leistung erfolgte in Halle beispielsweise auf die Hälfte der im täglichen Gebrauch regelmäßig wiederkehrenden Höchstleistungen der angeschlossenen Anlagen. Der Strompreis betrug alsdann, um die festen Kosten decken zu helfen, für die ersten 300, durch den Zeitzähler angezeigten Stunden, für 1 kWh ein zweifaches oder dreifaches der nach dieser Zeit verbrauchten Kilowattstunden. (Näheres hierüber Dr. Ing. Aug. Jung, „Der Zeitzählertarif". Berlin 1916, Julius Springer.)

(623) Münzzählertarife. Die Münzzähler haben sich auch wie die Gasselbstmesser bei den Gaswerken in den letzten Jahren mehr und mehr wegen der bequemen Zahlungsweise Eingang verschafft. Infolge der nicht unerheblich höheren Anschaffungskosten wird jedoch in der Regel bei diesem reinen Zählertarif ein etwas höherer Strompreis erhoben, was eigentlich nicht im Sinne der Kleinabnehmer, für welche dieser Tarif in erster Linie bestimmt sein soll, gelegen ist. Ein weiterer Mangel, der dem Münzzähler anhaftet, ist die schwierige Einstellung auf einen neuen Preis. Da gerade in den letzten Kriegsjahren vielfach der Preis in die Höhe gesetzt werden mußte und andererseits in einiger Zeit auch wieder ein Abbau der Preise zu erhoffen ist, so bietet die umständliche Einstellung der Münzzähler auf einen neuen Preis, die jedenfalls nur in der Fabrik vorgenommen werden kann, einen wesentlichen Hinderungsgrund für die Einführung derartiger Münzzähler.

Literatur: Siegel, Preisstellung beim Verkauf el. Energie. Berlin 1906, Jul. Springer. — Dr. Passow, Die gemischt-privaten und öffentlichen Unternehmungen auf dem Gebiete der Elektrizität und Gasversorgung. Jena 1912, G. Fischer. — Schmidt, Stromverteilung bei Zählertarifen und Zählerkontrolle bei städtischen E.-W. und Überlandzentralen. Berlin 1910, J. Springer. — Fleig, Stromtarife für Großabnehmer. Berlin 1913, J. Springer. — Laudien, Stromtarife. Leipzig 1912, Max Jännecke. — Laudien, Ein neues Benutzungsstundenzählverfahren. Berlin 1917, J. Springer. — Bund der Elektrizitätsversorgungs-Unternehmungen Deutschlands E. V., Bewegung der Preise für el. Arbeit seit dem Jahre 1914. Berlin NW. 7 1918, Selbstverlag.

Sechster Abschnitt.

Leitung und Verteilung.

Allgemeines.

(624) Direkte und indirekte Verteilung. Die Verteilungssysteme kann man einteilen in solche, bei denen die Stromerzeuger und die Stromverbraucher (Lampen, Motoren u. dgl.) elektrisch leitend miteinander verbunden sind, und in solche, bei denen beide getrennte Stromkreise bilden. Die erste Art nennt man direkte, die zweite Art indirekte Verteilung; bei der indirekten Verteilung dienen zur Arbeitsübertragung zwischen beiden Kreisen besondere Umformungsapparate, und zwar bei Wechselstrom meistens Transformatoren.

Eine Mittelstellung zwischen direkter und indirekter Verteilung nehmen die Gleichstromsysteme ein, welche Akkumulatorenbatterien benutzen. Der eigentliche Stromerzeuger ist dabei die Dynamomaschine; in den meisten Fällen ist sie gleichzeitig mit der Batterie und mit den Verbrauchseinrichtungen verbunden, sei es, daß sie an beide einen Teil ihrer Leistung abgibt und also die Batterie lädt, sei es, daß die Batterie sie bei der Versorgung der Lampen und Motoren unterstützt; zuweilen findet aber die Ladung der Sammler unter völliger Abtrennung von den Stromverbrauchern statt, ihre Entladung auf die Stromverbraucher unter vollständiger Trennung von der Dynamo, so daß das System dann zu den indirekten zu zählen ist.

(625) Verschiedene Schaltungsweisen. Bei jedem dieser Verteilungssysteme kann man die Verbraucher in verschiedener Weise schalten.

a) Reihen- oder Serienschaltung. Die Verbraucher werden einzeln derart hintereinander geschaltet, daß derselbe Strom sie alle nacheinander durchfließt; im ganzen Kreise herrscht daher dieselbe verhältnismäßig geringe Stromstärke, nämlich die der einzelnen Verbraucher, die demnach sämtlich für gleiche Stromstärke bemessen sein müssen. Dagegen wird die Betriebsspannung hoch, nämlich gleich der Summe der Spannungen der einzelnen Verbraucher. Wegen der geringen Stromstärke und der hohen Spannung, die auch einen verhältnismäßig großen Spannungsabfall in der Leitung gestattet, kann der Leitungsquerschnitt gering sein. Auch wird die Leitung kurz, da sie in einfacher Schleife von einem Verbraucher zum andern führt. Daher werden die Leitungskosten bei diesem System im allgemeinen am niedrigsten. Sein Nachteil liegt in der hohen, häufig lebensgefährlichen Spannung an den Verbrauchseinrichtungen und in deren Abhängigkeit voneinander in bezug auf Bemessung und Betrieb. So macht z. B. die Ausschaltung eines Verbrauchers gleich alle stromlos, wenn nicht durch besondere Vorrichtungen dem Strom ein Nebenweg geschaffen wird. Dies kann geschehen durch Anbringung von Kurzschlußvorrichtungen, die im Fall des Versagens eines Stromverbrauchers die Unterbrechungsstelle selbsttätig überbrücken, oder bei Verwendung von Wechselstrom durch parallel zu jedem Verbraucher geschaltete Drosselspulen. Das System wird nur selten angewendet.

b) Parallel- oder Nebeneinanderschaltung. Die von der Stromquelle gespeiste Hauptleitung durchzieht die ganze Anlage und entsendet an geeigneten Stellen Abzweigungen, die sich baumartig weiter verästeln bis zu

den einzelnen Verbrauchern (Abb. 342). Hauptleitungen und Abzweigungen bestehen stets aus mehreren (meistens 2 oder 3) Leitern, die gegeneinander überall ungefähr dieselbe Spannung aufweisen, nämlich die untereinander gleiche Betriebsspannung der einzelnen Verbraucher. Dagegen ist die Stromstärke in der Leitung von Abzweig zu Abzweig wechselnd; sie nimmt im allgemeinen von der Stromquelle bis zu den Verbrauchern bei jeder Verzweigung ab, und demgemäß sinkt meistens auch der Leitungsquerschnitt. Die Verhältnisse liegen hier demnach bezüglich Strom und Spannung umgekehrt wie beim Reihensystem. Die Anlagekosten sind bei dieser Schaltung groß, ihr Vorteil ist die Unabhängigkeit der einzelnen Verbraucher voneinander, und dieser Vorzug hat zu ihrer fast unbestrittenen Herrschaft geführt.

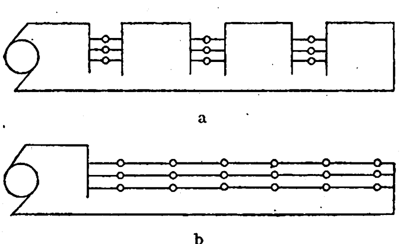


Abb. 341. Gemischte Schaltungen.

c) Gemischte Schaltungen.

1. Bei der Reihenschaltung von Gruppen werden je eine Anzahl von Verbrauchern, z. B. von Glühlampen (Abb. 341 a), parallel verbunden und mehrere solcher Gruppen von gleichem Gesamt**strom** hintereinander geschaltet.
2. Bei der Parallelschaltung von Reihen (Abb. 341 b) verbindet man eine bestimmte Anzahl von Lampen hintereinander und schaltet die erhaltenen Reihen von gleicher Gesamt**spannung** parallel.

Diese gemischten Schaltungen haben fast nur historisches Interesse. Die zweite wird wohl für Glühlampen in Straßenbahnwagen oder anderen Anlagen verwendet, wo die Beleuchtung Nebenzweck ist und nur eine Spannung zur Verfügung steht, die die für Glühlampen geeignete um ein Vielfaches übertrifft. Wenn solche Lampen gleichmäßig brennen und eine befriedigende Lebensdauer ergeben sollen, müssen sie sorgfältig „auf gleiche Stromstärke" sortiert sein.

Jede der erwähnten Schaltungsarten kann sowohl bei direkter wie bei indirekter Verteilung Verwendung finden. Die wesentlichen Eigenschaften der Schaltungsarten werden im folgenden unter „Direkte Verteilung" hervorgehoben.

Direkte und indirekte Verteilung und bei beiden wieder alle eben angedeuteten Schaltungsweisen lassen sich sowohl bei Gleichstrom als bei Wechselstrom und Mehrphasenstrom anwenden.

Direkte Verteilung.

Parallelschaltungs-Systeme.

(626) Maschinen und Lampen. Die Verbrauchsspannung an den Lampen beträgt meistens 110—250 V. Bogenlampen können parallel zu den Glühlampen gebrannt werden, wobei im allgemeinen je nach der Verbrauchsspannung und nach dem Lampensystem mehrere von ihnen in Reihe zu schalten sind (s. unter Bogenlampen, S. 497). Die Stromart ist meistens Gleichstrom; die Maschinen sind in diesem Falle meistens Nebenschlußmaschinen, selten solche mit gemischter Wicklung. Auch die Maschinen werden parallel zueinander geschaltet.

(627) Zweileitersystem, einfache Parallelschaltung (Abb. 342). Gewöhnlich wird im Maschinenraum eine Schalttafel angebracht; daran befinden sich die Sammelschienen S (+ und —), in denen die von den Dynamomaschinen gelieferten Ströme sich vereinigen, und von wo die Leitungen (je eine + und —) nach den verschiedenen Teilen der Anlage führen. In der Zeichnung sind die von den negativen Polklemmen der Dynamomaschinen ausgehenden Leitungen vereinigt und ohne

Zwischenfügung von Schaltern mit der negativen Sammelschiene verbunden. Dies ist durchaus zulässig; doch werden meistens auch die negativen Maschinenleitungen ebenso einzeln ausgeführt wie es hier für die positiven gezeichnet ist. An der Schalttafel werden die Unterbrecher *u* für die einzelnen Dynamomaschinen und *U* für die Leitungen, ferner die Schmelzsicherungen *B*, die selbsttätigen Maximal- und Minimalausschalter und die Strom- und Spannungsmesser angebracht; in unmittelbarer Nähe werden die Regulierwiderstände für die Dynamomaschinen und, wo erforderlich, für die Hauptleitungen aufgestellt. In kleineren Anlagen verzweigt sich jede der von der Schalttafel abgehenden Leitungen in der Art, wie es in Abb. 342 für eine von ihnen durchgeführt ist.

Bei großen Anlagen, besonders bei Stadtzentralen, führen die von der Schalttafel ausgehenden Speiseleitungen unverzweigt bis zu je einem an einer wichtigen Stelle des Verbrauchsgebietes liegenden Speisepunkte; dort schließen sich die Verteilungsleitungen an, die ein meistens zu geschlossenen Maschen vereinigtes Verteilungsnetz bilden. Von den Verteilungsleitungen zweigen die Zuleitungen zu den einzelnen Häusern ab (Hausanschlüsse). Dies ist schematisch in einem Teil

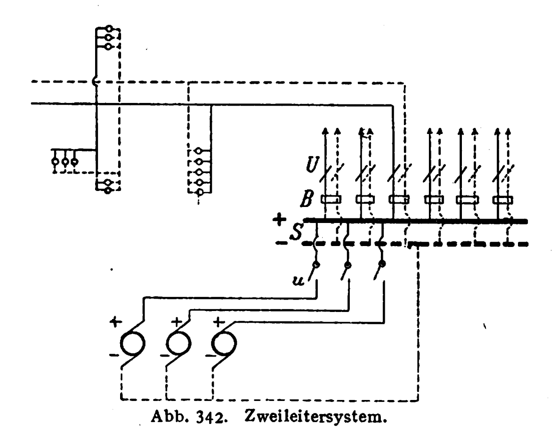


Abb. 342. Zweileitersystem.

der Abb. 343 angegeben. Die geschlossenen Maschen des Verteilungsnetzes bieten den Vorteil geringeren Spannungsverlustes und größerer Betriebssicherheit, da der Strom von zwei Seiten zugeführt wird, so daß in vielen Fällen auch noch bei Beschädigung einer Leitung alle Stromverbraucher versorgt werden können, wenn auch vielleicht zum Teil mit etwas knapper Spannung.

Spannungsregelung. In jeder Leitung findet ein Spannungsverlust statt, entsprechend ihrem Widerstande und der Stärke des in ihr fließenden Stromes. Infolgedessen erhalten die aus derselben Leitung gespeisten Verbraucher im allgemeinen etwas verschiedene Spannung, was sich besonders bei den Glühlampen durch trübes Brennen der einen, übermäßige Anstrengung und kurze Lebensdauer der anderen unangenehm bemerkbar macht. Wird infolge der Länge der Leitungen dieser Spannungsunterschied zu groß, so ist die Anordnung nach Abb. 342 nicht mehr brauchbar, sondern nur die nach Abb. 343 mit unverzweigten Speiseleitungen. In diesen kann ein hoher Spannungsverlust zugelassen werden, sofern er nur zur gleichen Zeit in allen Speiseleitungen gleich groß ist. Die Maschinenspannung muß dann um den Betrag dieses Spannungsverlustes (sowie des mittleren Spannungsabfalles von den Speisepunkten zu den Lampen) höher gehalten werden als die normale Lampenspannung. Behufs Kontrolle der Spannung an den Speisepunkten werden Meßleitungen von gleichem Widerstande, „Prüfdrähte" (gewöhnlich in den Kabeln schon vorgesehen) von den Speisepunkten nach der Zentrale gezogen

und mit einem Spannungsmesser verbunden, nach dessen Angaben die Maschinenspannung geregelt wird. Mittels Umschalters kann der Spannungsmesser entweder mit den Prüfdrähten der einzelnen Speisepunkte der Reihe nach verbunden werden, so daß er ihre Einzelspannung zeigt, oder mit allen gleichzeitig, wobei er ihren Mittelwert angibt. Nach diesem richtet sich im allgemeinen der Maschinist.

Einzelregulierung der Speisepunkte. In einer Anlage nach Abb. 343 wählt man die Querschnitte der einzelnen Speiseleitungen so, daß bei dem voraussichtlich eintretenden Verhältnis der Stromstärken in ihnen alle zur gleichen Zeit denselben Spannungsverlust ergeben. Würde dabei der Querschnitt einer besonders kurzen Speiseleitung kleiner als die Rücksicht auf Erwärmung zuläßt, so ist ihr ein fester Widerstand vorzuschalten. Ändert sich das bei der Querschnittwahl angenommene Belastungsverhältnis stark und häufig, so wird die Spannung an einzelnen Stellen des Netzes erheblich vom Normalwert abweichen,

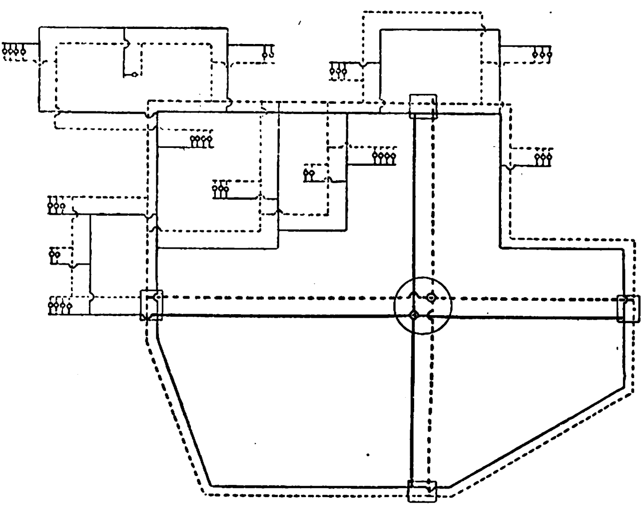


Abb. 343. Zweileiter-Verteilungsanlage.

wenn an den Sammelschienen nur eine Spannung eingestellt werden kann. Dann ergibt sich das Bedürfnis, die Spannung an bestimmten Speisepunkten einzeln zu regeln, etwa durch folgende Mittel:

a) Regulierbare Widerstände. In die Speiseleitungen, deren Belastung am meisten schwankt, werden (in der Zentrale) regulierbare Widerstände eingeschaltet. Die Maschinenspannung wird so reguliert, daß die (mittels der Prüfdrähte gemessene) Spannung an den nicht mit Regulierwiderständen versehenen Speisepunkten den normalen Wert hat. Die Widerstände werden so eingestellt, daß auch ihre Speisepunkte denselben Spannungswert zeigen. Wegen der großen Energieverluste in den Widerständen wird diese Methode nur aushilfsweise und nur bei einzelnen Speiseleitungen verwendet.

b) Fernleitungs-Dynamomaschine. In die zu regulierende Speiseleitung *FF* wird eine kleine Dynamomaschine eingeschaltet, deren Schenkel- und Ankerwicklung von dem Strom dieser Leitung durchflossen werden (Abb. 344). Die vom Anker *L* erzeugte Spannung addiert sich zur Spannung der Sammelschienen *A B*. Die Maschine ist so bemessen, daß auch beim größten vorkommenden Strom das Eisen nur schwach gesättigt ist. Folglich ist, da die Umdrehungszahl

konstant bleibt, die von der Maschine erzeugte Zusatzspannung dem Schenkelstrom, d. i. dem Strom der Speiseleitung proportional. Da der Spannungsverlust in der Leitung gleichfalls diesem Strom proportional ist, so kann man die Maschine und ihre Umdrehungszahl so wählen, daß sie entweder den Spannungsverlust in der Leitung bei jeder Stromstärke völlig ausgleicht oder den Widerstand derLeitung scheinbar auf einen kleineren gewünschten Wert verringert. Die Maschine muß hiernach für jeden Fall besonders berechnet und hergestellt werden.

Solche Zusatzmaschinen werden oft für lange Speiseleitungen elektrischer Bahnen verwendet; die Amerikaner nennen sie B o o s t e r.

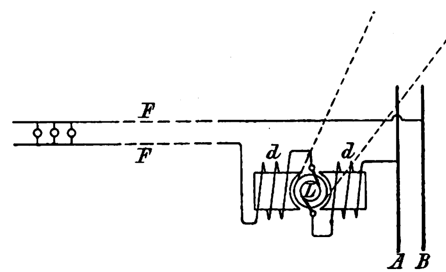


Abb. 344. Fernleitungsmaschine.

c) D o p p e l z e l l e n s c h a l t e r. Besitzt die Zentrale eine Akkumulatorenbatterie mit Doppelzellenschalter (635), so kann dessen Ladeschlitten außerhalb der Ladezeit (wo er sonst unbenutzt bleibt) dazu dienen, um eine oder mehrere besonders lange oder besonders hoch beanspruchte Speiseleitungen mit einer höheren Spannung zu versorgen als die übrigen. Die „langen" Speiseleitungen werden dann zur Zeit des hohen Stromverbrauches mittels einer besonderen Sammelschiene mit dem Ladeschlitten verbunden und seine Stellung wird nach der Spannung an den „fernen" Speisepunkten reguliert, während die Maschinenspannung und die Stellung des Entladeschlittens sich nach der Spannung der „nahen" Speisepunkte richten. Während der Ladung werden auch die langen Speiseleitungen auf den Entladeschlitten umgeschaltet.

Reihenschaltungs-Systeme.

(628) Als Stromquelle dienen bei Gleichstrom meistens Hauptstrommaschinen. Von B o g e n l a m p e n eignen sich für die Reihenschaltung am besten die Differentiallampen. G l ü h l a m p e n werden in reinen Reihensystemen nur selten verwendet. Einen Sonderfall bildet die Beleuchtung des Kaiser-Wilhelm-Kanals; die 100 km lange Strecke wird mit Wechselstrom durch Reihen von 250 Stück 25kerziger Glühlampen von je 25 V Klemmenspannung beleuchtet, wobei eine Drosselspule parallel zu jeder Glühlampe geschaltet ist. (Vgl. H e r z o g und F e l d m a n n, Handbuch der elektrischen Beleuchtung.) B o g e n l a m p e n werden i n R e i h e n von 2 bis zu etwa 10 Stück verwendet. In Amerika findet man aber noch die alte Anordnung von Bogenlampen in Reihen bis zu 100 Stück und mehr, die von Gleichstrommaschinen bis zu 6000 V betrieben werden. Sollen einzelne Lampen gelöscht werden, so werden Ersatzwiderstände eingeschaltet. Bei Verwendung von Spezialtransformatoren, die auf konstante Sekundärstromstärke regulieren, werden in Amerika auch Bogenlampen und Glühlampenstromkreise in Reihenschaltung angeordnet und ausgedehnte Straßenbeleuchtungen nach diesem von der G e n e r a l E l e c t r i c C o m p a n y ausgebildeten Systeme versorgt[1]).

T h u r y s c h e s S y s t e m. Thury schaltet eine Reihe von Motoren verschiedener Größe hintereinander, von denen jeder mit einem selbsttätigen Kurzschließer versehen ist. Die Stromstärke im Kreise ist konstant, die Spannung je nach der Größe des Motors verschieden. Die gesamte Betriebsspannung in der

[1]) s. F e l d m a n n, ETZ 1904, H. 35, auch die Veröffentlichungen der General Electric Company über „The series incandescent street lighting system".



Zentrale wird dabei meistens sehr hoch; zu ihrer Erzeugung werden auch die Dynamomaschinen in Reihe geschaltet. Die Motoren werden entweder unmittelbar zur Kraftabgabe verwendet, oder es ist jeder von ihnen mit einer Dynamo gekuppelt, die ein Niederspannungsnetz nach dem Parallelschaltungssystem speist. Das Thurysystem eignet sich nur für eine nicht zu große Anzahl von großen Motoren.

Mehrleiter-Systeme.

(629) Dreileiter-System. Die Verbraucher werden in zwei Hälften geteilt, von denen jede eine besondere Leitung mit eigener Stromquelle erhält, jedoch so, daß beide Anlagen einen Leiter, den Mittelleiter, gemeinsam haben. Je zwei Stromerzeuger sind in Reihe geschaltet, so daß die Spannung zwischen den Außenleitern das Doppelte der Lampenspannung beträgt (Abb. 345). Hierbei fließt in dem Mittelleiter nur die Differenz der Stromstärken der beiden Außenleiter; ersterer kann daher im allgemeinen erheblich schwächer gewählt werden. Die Lampen und kleinen Motoren werden zwischen Mittelleiter und einen Außenleiter geschaltet, große Motoren zwischen die beiden Außenleiter. Der Vorzug dieses Systems besteht darin, daß es den großen Vorteil höherer Betriebsspannung (Ersparnis an Leitungsmaterial) mit den Vorteilen niedriger Lampenspannung (billigere, haltbarere, sparsamere und minder starke Lampen) verbindet, während im Gegensatz zum Reihenschaltungssystem die einzelnen Verbraucher voneinander unabhängig bleiben.

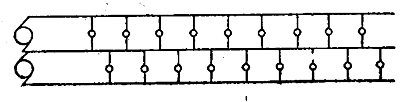


Abb. 345. Dreileitersystem.

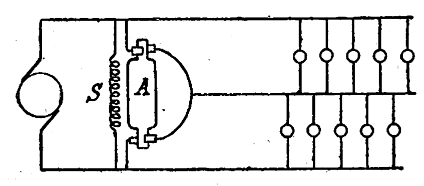


Abb. 346. Spannungsregelung im Dreileitersystem.

Die Regelung geschieht ebenso wie beim Zweileitersystem, und zwar werden die beiden Seiten des Dreileitersystems einzeln reguliert. Statt der zwei getrennten Maschinen mit Lampenspannung in Abb. 345 werden meistens Maschinen mit Außenleiterspannung verwendet. Für den Anschluß des Mittelleiters ist dann durch eins der folgenden besonderen Mittel ein „Nullpunkt" herzustellen:

a) Die Maschinen können als „Dreileitermaschinen" nach (419) ausgeführt oder mit dem dort beschriebenen „Spannungsteiler" ausgestattet sein.

b) Die Hauptmaschinen sind gewöhnliche Nebenschlußmaschinen mit Außenleiterspannung. Zwischen den Außenleitern liegt eine Akkumulatorenbatterie, an deren Mittelpunkt der Mittelleiter angeschlossen wird. Bei ungleichmäßiger Belastung der beiden Netzhälften übernimmt die Batterie den Ausgleich, wobei sie freilich schief entladen wird. Es ist daher die Möglichkeit einseitiger Wiederaufladung vorzusehen.

c) Die Hauptmaschinen sind geschaltet wie unter b. Zwischen die Außenleiter sind zwei kleine in Reihe geschaltete, mechanisch miteinander gekuppelte, gleiche „Ausgleichmaschinen" von Lampenspannung geschaltet, die aber keinerlei mechanischen Antrieb erhalten. Zwischen ihnen mündet der Mittelleiter, so daß ein Schaltbild entsteht wie Abb. 345, wenn man dazu die Dynamomaschine aus Abb. 346 ergänzt.

Solange beide Hälften des Netzes gleich belastet sind, fließt durch die Anker der Ausgleichmaschinen nur der Leerlaufstrom. Wird eine Netzhälfte entlastet, so steigt auf dieser Seite die Spannung ein wenig, die zugehörige Ausgleichmaschine wirkt als Motor, die andere gibt als Dynamo Strom in den stärker belasteten Zweig. Da beide Maschinenanker (weil mechanisch gekuppelt) sich mit derselben Ge-

schwindigkeit in gleich starken Feldern drehen, so erzeugen sie gleiche EMK; das Potential des Mittelleiters bleibt also ungefähr in der Mitte zwischen denen der Außenleiter. Die Differenz der Ströme in den Ankern der beiden Ausgleichmaschinen wird dem Mittelleiter zugeführt. Die Ausgleichmaschinen brauchen demnach nur für die Stromdifferenz der Außenleiter bemessen zu werden und fallen daher nur klein aus.

Beide Maschinen können auch derart miteinander vereinigt sein, daß sie zu einer Maschine mit zwei gleichen Bewicklungen auf demselben Anker und mit zwei Kollektoren verschmelzen; dann entsteht das Schaltbild Abb. 346, in dem *A* den Anker und *S* die Schenkelwicklung bedeutet.

Beide Mittel b und c werden oft nebeneinander verwendet; dann können die Ausgleichmaschinen zugleich zum Antrieb der Lademaschine für die Batterie dienen.

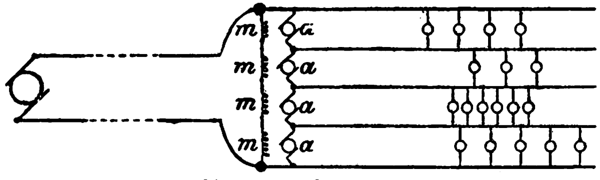


Abb. 347. Fünfleitersystem.

(630) Fünfleitersystem. Dieses kann als Verdoppelung des Dreileitersystems nach Abb. 345 oder 346 ausgeführt werden und ist in Abb. 347 dargestellt. Die Zentrale erzeugt etwa 500 V und führt den Unterstationen den Strom mit dieser Spannung durch je zwei Leitungen zu. Die Unterstationen unterteilen die Spannung etwa in 4×110 V und geben den Strom so durch je 5 Leitungen in das Netz weiter. Die Unterteilung erfolgt durch kleine Dynamomaschinen, deren Feldmagnete *m* aus den Hauptleitungen gespeist werden und deren Anker *a* auf einer gemeinsamen Welle sitzen, oder durch entsprechende Sammlerbatterien. Das System hat praktisch keine Bedeutung mehr, seitdem es gelungen ist, Glühlampen für Spannungen bis 250 V herzustellen, und infolgedessen auch ein Dreileitersystem mit der Spannung von ca. 500 V betrieben werden kann.

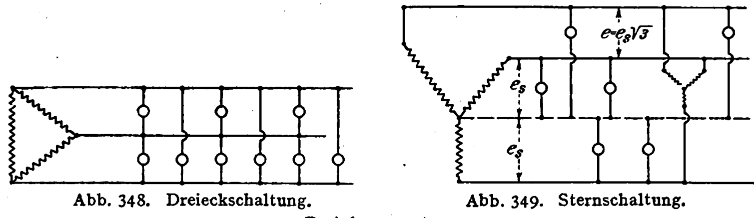


Abb. 348. Dreieckschaltung. Abb. 349. Sternschaltung.

Dreiphasensystem.

(631) Mehrphasensysteme. Wenn Abb. 345 ein Zweiphasensystem darstellen soll, müssen die beiden Dynamos Wechselspannungen gleicher Größe liefern, die um $1/4$ Periode oder 90° gegeneinander verschoben sind; dann führen die beiden Außenleiter der Abb. 345 um 90° gegeneinander versetzte Wechselströme, der Mittelleiter führt die geometrische Summe oder einen $\sqrt{2}$ mal stärkeren Strom. Beim Dreiphasen- oder Drehstromsystem wirken drei gleich große, gegeneinander um $1/3$ Periode oder 120° verschobene Spannungen auf drei Leiter, zwischen denen drei Gruppen von Verbrauchern eingeschaltet werden können. Stromquelle und Verbraucher können dabei entweder im Dreieck (Abb. 348) oder im Stern (Abb. 349)

geschaltet sein. Im letzteren Falle kann man auch den neutralen oder Sternpunkt, dessen Spannung e_s gegen die drei Leiter (Sternspannung) $\sqrt{3}$ mal kleiner ist als die Hauptspannung e, als Ausgangspunkt einer neutralen Leitung verwenden, so daß man z. B. Motoren mit 190 V (oder 220 V) zwischen den Hauptleitungen und Lampen mit 110 V (oder 127 V) zwischen der neutralen Leitung und je einer der Hauptleitungen betreiben kann. Bei ausgedehnteren Verteilungsnetzen verwendet man auch 220-V-Sternspannung und 380-V-Außenleiterspannung; hierbei empfiehlt es sich, die neutrale Leitung (Null-Leiter, Mittel-Leiter) betriebsmäßig zuverlässig zu erden, weil sonst die Anlagen, insbesondere auch die angeschlossenen Installationen, als Hochspannungsanlagen gelten und daher vorsichtiger (folglich auch teurer) angelegt und betrieben werden müssen (632).

(632) Blanker Mittelleiter. Oft wird der Mittelleiter des Dreileiter-Gleichstrom-Systems nicht isoliert, sondern als blanke Leitung in die Erde gelegt. Ein Isolationsfehler an einem Außenleiter wirkt dann wie ein Erdschluß und kann wie ein solcher aufgesucht und beseitigt werden. Der blanke Mittelleiter wird dort, wo mehrere Speise- und Verteilungsleitungen nebeneinander liegen, nicht für jede derselben einzeln verlegt, sondern zusammengefaßt, wobei oft Ersparnisse bezüglich des Querschnittes möglich sind. Außer der Ersparnis an Isolationskosten (besonders bei Kabelnetzen) bietet die blanke Verlegung des Mittelleiters den Vorteil, daß die höchste Spannung gegen Erde, die an den Verbrauchern auftreten kann, dadurch verringert wird (631). Über elektrolytische Wirkung s. (666).

Auch bei Mehrphasensystemen in Sternschaltung wird meistens der Nullpunkt geerdet. Der neutrale Leiter wird bei Drehstromkabelnetzen entweder durch eine vierte (meist schwächere) Ader gebildet oder blank in die Erde verlegt. Auch kann der Bleimantel der Drehstromkabel, wenn er genügend stark bemessen und in den Muffen sorgfältig überbrückt wird, als neutraler Leiter dienen. Die Reichs-Telegraphenverwaltung verlangt, daß der blanke und geerdete Mittelleiter nicht mit Gas- oder Wasserleitungsnetzen verbunden wird, an welche die vorhandenen Telegraphen- oder Fernsprechleitungen angeschlossen sind.

Bei allen Stromarten können in den Hausinstallationen große Ersparnisse dadurch gemacht werden, daß alle mit dem geerdeten Mittelleiter (neutralen Leiter) verbundenen Leitungen auch hier blank verlegt werden und keinerlei Apparate, wie Schalter, Sicherungen u. dgl. erhalten. Die Verlegung dieser blanken Leitung erfolgt dann zweckmäßig ebenso wie die der zugehörigen isolierten, um sie vor Verwechslung mit anderen nicht elektrischen Drähten und vor achtloser Behandlung bei Bauarbeiten zu schützen. Eine besondere Anwendungsart dieses Gedankens stellt der Rohr- oder Falzdraht dar (673).

Indirekte Verteilung.

A. Gleichstrom.

(633) Allgemeines. Die indirekte Abgabe von Gleichstrom wird erforderlich, wenn die direkte aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen sich verbietet, oder wenn in Wechselstromnetzen Gleichstrom verlangt wird.

Bei großen Elektrizitätsverteilungsanlagen, deren Kraftwerke nicht in unmittelbarer Nähe der Verbrauchsstellen errichtet werden können, wird die Arbeit als hochgespannter Wechsel- oder Drehstrom erzeugt, so durch Fernleitungen nach Unterstationen übertragen und hier durch geeignete Maschinen (Motorgeneratoren, Einanker- oder Kaskadenumformer) oder durch Gleichrichter in Gleichstrom verwandelt, der dann nach einem der vorhin unter „direkte Verteilung" beschriebenen Systeme weiter verteilt wird.

(634) Umformer und Gleichrichter. a) Motorgeneratoren. Die Synchronmotorgeneratoren sind in bezug auf Überlastung und Stromschwankungen oder Stromunterbrechungen empfindlich und erfordern für die Inbetriebsetzung

besondere Hilfsmittel (asynchroner Anwurfmotor oder dgl.); letzterer Nachteil entfällt, sofern schon beim Anlassen Gleichstrom zur Verfügung steht; dann kann man beim Anlassen den Gleichstromgenerator als Motor benutzen. Der Synchronumformer wird bevorzugt, wenn der Leistungsfaktor der Anlage verbessert werden soll; dies geschieht durch Übererregung des Motors, d. h. durch Erzeugung eines in der Phase voreilenden Stromes (486).

Der Asynchronmotorgenerator kann drehstromseitig ohne besondere Hilfsmittel angelassen werden, sein Außertrittfallen bei momentanen Überlastungen, Spannungsschwankungen usw. ist weniger zu befürchten als bei dem synchronen (487 u.f.).

In Betrieben mit besonders großen Belastungsschwankungen werden die Asynchronmotorgeneratoren mit Schwungmassen versehen, welche die Beanspruchung der Primärmaschinen günstig beeinflussen und übermäßige Stromstöße im Netze vermeiden (747c).

b) Einankerumformer oder Konverter (auch „Umformer" schlechthin) zeigen die charakteristischen Eigenschaften von Synchronmotoren. Der Wirkungsgrad von Einankerumformern ist auch unter Berücksichtigung des bei ihnen fast stets erforderlichen Transformators günstiger als derjenige von Motorgeneratoren, wenn nicht eine Drosselspule vorgeschaltet wird (558 und 559).

Die Gleichstromspannung von Einankerumformern ist von der zugeführten Wechsel- oder Drehstromspannung abhängig und kann durch Änderung der Erregung nur in engen Grenzen reguliert werden (559).

Um die Spannung in weiten Grenzen regulieren zu können, wendet man verschiedene Hilfsmittel an: Man versieht den zum Umformer gehörenden Transformator mit mehreren Anzapfungen, die durch einen nach Art der Zellenschalter gebauten Umschalter wahlweise mit den Schleifringen des Umformers verbunden werden können. Oder man schaltet zwischen Transformator und Umformer einen Drehtransformator (Induktionsregler) ein, der zur Transformatorspannung eine Zusatzspannung addiert, die aber je nach seiner Stellung verschiedene Phase hat. In ähnlicher Weise wirkt eine auf der Umformerwelle befestigte kleine Wechselstrommaschine, deren Anker zwischen die Schleifringe und den Umformeranker geschaltet ist und dessen Feldmagnetisierung durch Regulierwiderstand und Umschalter nach Stärke und Sinn verändert werden kann. Endlich kann auch eine Gleichstromzusatzmaschine demselben Zweck dienen, deren Feld reguliert wird, wie eben angegeben, und deren Anker mit einer der beiden Gleichstromklemmen des Umformers in Reihe geschaltet ist.

c) Kaskadenumformer (Abb. 294, S. 356) eignen sich besonders für höhere Frequenzen und erfordern, ebenso wie die Motorgeneratoren, bei nicht gar zu hoher Drehstromspannung, keinen Transformator. Der Ständer wird primär an die Drehstromleitung angeschlossen, der mehrphasige Läufer ist mechanisch mit einer Gleichstromdynamomaschine gekuppelt und seine Wicklung mit derjenigen der Gleichstromdynamo elektrisch verbunden. Im übrigen (561).

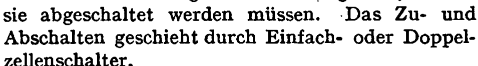
d) Quecksilbergleichrichter waren, solange sie nur mit Glaskolben ausgeführt wurden, nur für die Umformung kleiner Leistungen verwendbar (für Elektromobile, Projektionslampen u. dgl.). In den letzten Jahren ist es durch Verwendung von Stahlzylindern gelungen, sie auch für größere Leistungen geeignet zu machen, und es befinden sich solche Apparate in verantwortlichem Betriebe zur Versorgung von Straßenbahnen usw. (564) und Abb. 329.

(635) Akkumulatoren (Sammler). Zur Aufspeicherung von elektrischer Arbeit in Zeiten geringen Bedarfes und deren späterer Abgabe während des Höchstbedarfes werden Sammlerbatterien benutzt; zugleich dienen sie als Not- und Momentreserve bei Maschinenschaden, zur Abkürzung des Maschinenbetriebes und zur Milderung von Spannungsschwankungen (598). Sie bestehen aus einer durch die Betriebsspannung bestimmten Anzahl hintereinander geschalteter Elemente (Zellen), deren räumliche Größe von der verlangten Kapazität abhängig ist. Für

stationäre Zwecke kommt heute fast ausschließlich der Bleiakkumulator in Betracht; der Nickel-Eisenakkumulator (E d i s o n und J u n g n e r) hat bisher nur in geringem Maße Aufnahme gefunden (578 u. f., 592 u. f.).

Die Elementspannung eines Bleiakkumulators steigt bei der Ladung bis auf etwa 2,75 V und fällt während der Entladung auf etwa 1,83 V; vgl. (580). Die erforderliche Zellenzahl wird hieraus berechnet (600).

Z e l l e n s c h a l t e r. Da die Spannung einer Zelle je nach Ladezustand und Stromstärke schwankt und außerdem die Spannung der Sammelschienen je nach dem Spannungsverlust in den Speiseleitungen verändert werden muß, so wird von Zeit zu Zeit ein Zu- und Abschalten von Zellen erforderlich. Bei der Entladung müssen immer weitere Zellen mit herangezogen werden, die bis dahin in Reserve standen („Schaltzellen"). Diese werden demnach weniger entladen als die „Stammzellen" und sind daher auch bei der Ladung wieder früher gefüllt, worauf sie abgeschaltet werden müssen. Das Zu- und Abschalten geschieht durch Einfach- oder Doppelzellenschalter.



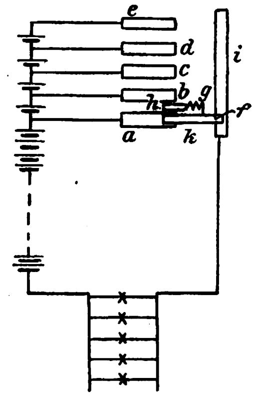


Abb. 350. Schaltbild eines Einfach-Zellenschalters.

Der Einfachzellenschalter (Abb. 350) besteht aus einer Reihe von Kontakten *a, b, c, d, e,* dem Schlitten *k* — bei kleineren Zellenschaltern einem Kontaktarm — und der Kontaktschiene *i*. Die Kontakte stehen mit den Schaltzellen, die Schiene *i* und die erste Stammzelle mit den Sammelschienen bzw. dem Netz in der angedeuteten Weise in Verbindung. Auf dem Schlitten *k* befinden sich — in einem bestimmten Abstande voneinander — zwei Schleifbürsten *f* und *h*, die durch einen Widerstand *g* verbunden sind. Diese Anordnung verhindert bei der Fortbewegung des Schlittens einerseits eine Stromunterbrechung, andrerseits das Kurzschließen der betreffenden Schaltzelle. Einfachzellenschalter genügen nur dann, wenn die Batterie während der Ladung nicht zur Spannungsregulierung des Netzes gebraucht werden soll; andernfalls werden Doppelzellenschalter erforderlich. Der Doppelzellenschalter unterscheidet sich von dem Einfachzellenschalter nur dadurch, daß auf der gleichen Kontaktbahn *a, b, c, d, e* (Abb. 351) zwei Schlitten oder Kontaktarme *f, h* gleiten, von denen der eine (in dem Schaltbild der linke) mit der Stromzuleitung, der andere (rechte) mit der Ableitung verbunden ist. Bei dieser Anordnung kann der „Entladeschlitten" *f* dauernd mit dem Netz verbunden bleiben; seine Stellung wird ausschließlich durch die Netzspannung bedingt. Der „Ladeschlitten" *h* wird dagegen nur während der Ladung benutzt [vgl. jedoch (627) „Spannungsregelung" unter c] und ausschließlich danach verstellt, ob die letzte eingeschaltete Schaltzelle voll geladen ist („kocht"). Die Zahl der Schaltzellen, der Zellenschalterkontakte und der Verbindungsleitungen (!) zwischen beiden muß beim Doppelzellenschalter wesentlich größer sein als beim Einfachzellenschalter (600). Jene Leitungen sind möglichst kurz zu halten, so daß sich oft Aufstellung der Zellenschalter nahe den Schaltzellen fern von der Schalttafel empfiehlt, was mechanische oder elektrische Fernbetätigung und Rückmeldung ihrer Stellung bedingt.

Der in Abb. 351 angedeutete Anschlag *g* verhindert rein mechanisch, daß der Entladeschlitten dem äußersten Kontakt *e* näher rückt als der Ladeschlitten, was während der Ladung eine Umkehrung der Stromrichtung bzw. Entladung und im weiteren Verlaufe eine Schädigung der zwischen den beiden Schlitten liegenden Schaltzellen zur Folge haben könnte.

Zwischen je zwei Kontakten, z. B. zwischen *e* und *d* liegt bei einer Lampenspannung von etwa 110 V eine Zelle; bei der doppelten Lampenspannung pflegt

man jedoch nur jede zweite Schaltzelle an den Zellschalter anzuschließen (Abb. 352), so daß eine Schlittenbewegung um eine volle Kontaktdistanz *ed* einen Spannungssprung von etwa 4 V ergibt, das ist prozentual ebensoviel wie vorhin. Eine weitere Einschränkung der teuren und sperrigen Zellenschalterleitungen bezweckt der in Abb. 352 dargestellte Zellenschalter „mit Hilfszelle". Die Schleifbürsten *g* und *h* sind mechanisch miteinander fest verbunden und mit dem Umschalter *mon* so gekuppelt, daß dieser in die rechte Lage *n* übergeht, wenn der Schlitten sich um einen halben Kontaktabstand bewegt. In der gezeichneten Stellung ist die Hilfszelle *q* mit der Stammbatterie und den zwischen *a* und *d* liegenden Schaltzellen in Reihe geschaltet.

Wird nun der Schlitten um die Hälfte einer Kontaktdistanz verschoben, so wird einerseits die Bürste *h* (statt *g*) wirksam, andrerseits wird gleichzeitig die Hilfszelle *q* ausgeschaltet. Es ist leicht zu erkennen, daß dadurch die Spannungssprünge sowohl aufwärts wie abwärts auf etwa 2 V ermäßigt werden, während sie ohne die Hilfszelle 4 V betragen würden. Der Widerstand *p* mildert den „Kurzschlußstrom", der in dem Moment entsteht, wo beide Bürsten *g* und *h* je einen Kontakt berühren und ebenso der Umschalter *mo* die beiden oberen Kontakte überbrückt.

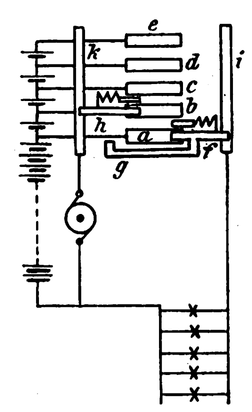


Abb. 351. Schaltbild eines Doppel-Zellenschalters.

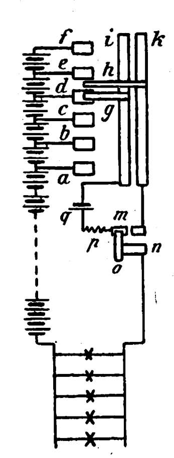


Abb. 352. Schaltbild eines Einfach-Zellenschalters mit Hilfszelle.

W a h l d e r B a t t e r i e u n d L a d e m a s c h i n e. Die Größe („Type") der Zellen wird durch die aus der Batterie höchstens zu entnehmende Strommenge („Kapazität", meistens ausgedrückt in Amperestunden), die jedoch von der Entladezeit abhängig ist (582), und durch die höchste Stromstärke bestimmt, zweckmäßig jedoch nicht immer nach dem augenblicklichen Bedürfnis, sondern mit Rücksicht auf die Zukunft bemessen. Berechnung vgl. (600). Doch sind dabei die Kosten der Beschaffung und Instandhaltung sorgfältig gegen die Vorteile abzuwägen. Mit Rücksicht auf spätere Erweiterung empfiehlt es sich oft, von vorn herein Gefäße einer größeren Elementtype zu wählen und die Leitungen und Zellenschalter entsprechend der späteren Höchststromstärke (nach voller Besetzung der Gefäße), also für die Höchstleistung jener Type zu bemessen. Die Kapazität kann dann später schnell und ohne weitere Veränderungen durch Einbau von weiteren Plattenpaaren in die Gefäße erhöht werden.

Als Lademaschinen kommen nur Nebenschlußdynamomaschinen in Frage (589). Die für den letzten Teil der Ladung und besonders für das gelegentlich erforderliche

Überladen der ganzen Batterie nötige erhebliche Spannungserhöhung kann durch die Hauptmaschine selbst erzeugt werden, und zwar durch Verstärkung ihrer Erregung, unter Umständen unter Zuhilfenahme einer Erhöhung der Umdrehungszahl. Durch Wendepole läßt sich erreichen, daß solche Maschinen in diesen weiten Spannungsgrenzen bei jeder Stromstärke ohne Bürstenverschiebung funkenfrei laufen. Freilich werden sie teuer, da ihr Eisen beim normalen Betriebe nicht voll ausgenutzt ist. Daher wird oft für die Ladung eine besondere Zusatzmaschine verwendet, die meistens durch einen Elektromotor angetrieben wird (589).

Die Ladung einer Batterie aus einem Netz mit konstanter Spannung erfolgt am wirtschaftlichsten mittels eines derartigen „Zusatzaggregates". Sie kann auch durch Teilung der Batterie in Gruppen erfolgen, deren höchste Ladespannung unter der Netzspannung liegt; doch ist dies Verfahren nicht sparsam, weil dabei ein großer Teil der Arbeit in den Regulierwiderständen verbraucht wird, die während der Ladung den Batteriegruppen vorgeschaltet werden müssen.

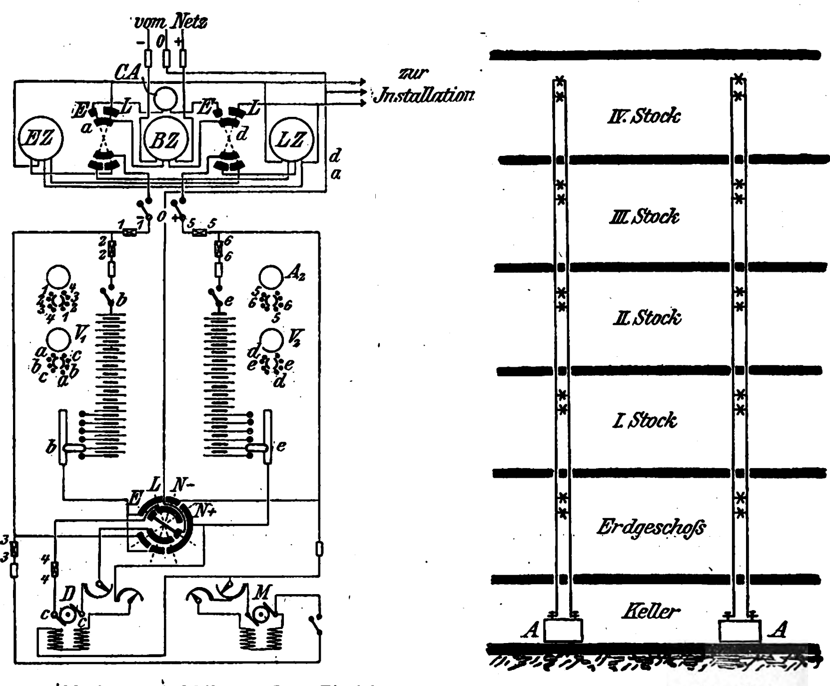


Abb. 353. Schaltbild der Lade-Einrichtung einer Anschlußbatterie.

Abb. 354. Schema einer Notbeleuchtung nach Brandt.

S c h a l t u n g e n. Je nach Art und Zweck einer Anlage ändert sich auch ihre Schaltungsweise. Eine umfassende Zusammenstellung von wichtigen Schaltungsbildern für Akkumulatorenanlagen befindet sich in dem Taschenbuch der A k k u m u l a t o r e n f a b r i k A.-G. sowie in dem Band I der Tafeln zum „Lehrgang der Schaltungsschemata elektrischer Starkstromanlagen" von T e i c h m ü l l e r.

B a t t e r i e n f ü r b e s o n d e r e Z w e c k e. a) P u f f e r b a t t e r i e n dienen dazu, plötzliche Belastungen und Entlastungen des Netzes dadurch aus-

zugleichen, daß die Batterie bei Belastung des Netzes entladen und bei der Entlastung geladen wird, so daß die Antriebsmaschine trotz großer Bedarfsschwankungen gleichmäßig belastet bleibt und daher günstig arbeitet (s. auch L. Schröder, Anwendung von Pufferbatterien bei Drehstrom, ETZ 1906, S. 324) [Pirani-Schaltung (808)].

b) Anschlußbatterien werden die Batterien in solchen Anlagen genannt, welche im Anschluß an ein Gleichstromverteilungsnetz von größeren Stromabnehmern errichtet werden. Sie werden während der Zeit der Höchstbelastung des Elektrizitätswerkes entladen und außerhalb dieser Zeit wieder geladen. Der Abnehmer belastet das Elektrizitätswerk somit nur außerhalb des Maximums und erhält daher den Strom zu einem wesentlich niedrigeren Tarife. Das Schaltbild einer derartigen Anlage ist in Abb. 353 dargestellt. Darin bedeutet *BZ* den „Bruttozähler", der die gesamte dem Netz entnommene Arbeit mißt, *LZ* den Ladezähler, der den in die Batterie geladenen, und *EZ* den Entladezähler, der den aus ihr entnommenen Strom registriert. Zwischen den Zählern liegen zwei Umschalter *a*, *d*, die bei Ladung auf *L*, bei Entladung auf *E* gestellt werden. *D* ist eine Zusatzdynamo, *M* der sie antreibende Motor. Der über *M* und *D* gezeichnete Hauptumschalter hat vier Stellungen: *E* für Entladung, *L* für Ladung der ganzen Batterie, wobei die Dynamo *D* zwischen die beiden Batteriehälften geschaltet ist, *N*+ und *N*− für die Nachladung der einzelnen Batteriehälften. Je zwei Strom- und Spannungsmesser mit Umschaltern dienen zur Kontrolle der Vorgänge in der Batterie. (Die Ziffern und Buchstaben an ihren Umschaltern und im Schaltbild bezeichnen die miteinander durch Meßleitungen verbundenen Punkte.) Ein Kontrollapparat *CA* stellt die Betriebszeit fest.

Diese häufig ausgeführte Schaltung hat den Vorzug eines hohen Wirkungsgrades, der jederzeit durch den Vergleich der Zählerangaben kontrolliert werden kann.

Batterien für Notbeleuchtung werden oft für stark besuchte Gebäude, wie Geschäftshäuser, Theater, Gasthöfe usw., von den Aufsichtsbehörden verlangt. Eine derartige Notbeleuchtung, und zwar nach Brandt, ist in Abb. 354 veranschaulicht. Die besonderen Merkmale dieser Anordnung sind die in den einzelnen Stockwerken übereinander liegenden Notlampen, die an je eine senkrecht verlaufende Leitung angeschlossen sind und von getrennt aufgestellten Akkumulatorenelementen *A* mit Strom versorgt werden.

B. Wechselstrom.

(636) Allgemeines. Die indirekte Verteilung durch Wechselstrom beruht darauf, daß bei dieser Stromart die Arbeit von einer Spannung auf eine andere durch ruhende Apparate, „Transformatoren", umgeformt werden kann. Die wichtigste Eigenschaft der hierfür meistens verwendeten Transformatoren ist die, daß bei konstanter zugeführter Primärspannung auch die von ihnen gelieferte Sekundärspannung bei allen Belastungen nahezu konstant bleibt, wenn, wie üblich, ihre Wicklungswiderstände und ihre magnetische Streuung klein sind.

Die indirekte Verteilung durch Transformation findet vor allem Anwendung zur Energieübertragung großer Arbeitsmengen auf weite Entfernungen, die eine direkte Verteilung ausschließen, weil die lange Leitung eine hohe, die Verbraucher aber eine niedrige Spannung bedingen. Große Motoren können unter Umständen mit der hohen Übertragungsspannung betrieben werden; kleine lassen sich dafür nicht mehr hinreichend betriebssicher herstellen und ebenso erfordern alle anderen Verbrauchsapparate, insbesondere Glüh- und Bogenlampen die vorherige Transformation. Oft wird die Übertragungsspannung so hoch gewählt, daß selbst die großen Dynamos des Kraftwerkes nicht für sie gebaut werden können, so daß die Spannung im Kraftwerk durch Transformatoren erhöht und an den Verbrauchsstellen wieder erniedrigt werden muß.

Eine Reihenschaltung von Transformatoren findet nur sehr selten statt, beispielsweise bei Straßenbeleuchtungsanlagen, um an Leitungsmaterial zu sparen. Hierbei erhält jede einzelne Glühlampe oder Bogenlampe ihren eigenen kleinen Transformator. Die Primärwicklungen der Transformatoren sind in Reihe geschaltet, der Strom wird konstant gehalten.

Dagegen ist die Parallelschaltung von Transformatoren durchaus üblich; in den Stationen werden sie, ähnlich wie Dynamomaschinen, Motoren oder Batterien parallel zueinander auf dieselben Sammelschienen geschaltet, im Verteilungsnetz sind sie oft durch die Netzmaschen so miteinander verbunden wie in Abb. 343 die vier Speisepunkte (638).

Zuweilen findet auch in Niederspannungsanlagen eine Transformation statt, um Verbrauchsapparate zu betätigen, deren Betriebsspannung noch niedriger ist als diejenige des Verteilungsnetzes; beispielsweise zum Antrieb ganz kleiner Motoren, Bogenlampen in Einzelschaltung oder Glühlampen für ganz niedrige Spannungen, oder um etwa kleinen Hausanschlüssen an einem Netze von 220 V die Vorteile der Lampen von 110 V zu verschaffen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit verwendet man hierbei häufig nicht Transformatoren mit getrennter Primär- und Sekundärwicklung, sondern sogenannte Spartransformatoren (337) und deren Abarten, Reduktoren, Divisoren usw.

(637) Einzeltransformatoren. Bei diesem System erhält jede selbständige Gruppe von Stromverbrauchern (etwa jedes Haus oder Dorf, Häuserblock, Fabrik, Werkstatt) ihren eigenen Transformator unabhängig von den übrigen Verbrauchsstellen. Große Anlagen erhalten zwei parallel geschaltete Transformatoren, zweckmäßig von verschiedener Größe derart, daß sie zusammen der Höchstbelastung genügen, während in den Stunden geringen Bedarfs der kleinere allein ausreicht. Behufs Verringerung der Leerlaufsverluste wird der große entsprechend der schwankenden Belastung von Hand oder durch automatische Schalter zu- und abgeschaltet (primär und sekundär!). Ohne solche Abschaltung, die freilich umständlich und teuer ist, werden die Leerlaufsverluste oft sehr groß, weil die Transformatorengröße dem vielleicht nur selten und kurzzeitig eintretenden Höchstbedarf der angeschlossenen Stromverbraucher angepaßt sein muß, der Leerlaufsverbrauch (Eisenverlust) aber nur von der Größe und Betriebsdauer des Transformators, nicht von seiner Ausnutzung abhängt. Die Verwendung von Transformatoren mit geringen Eisenverlusten ist daher hier um so wichtiger, je teurer der Strom und je geringer die Ausnutzung des Transformators ist. Dies ist besonders bei rein landwirtschaftlichen Anlagen zu beachten.

(638) Zusammenhängendes Sekundärnetz. Die Nachteile des vorgenannten Systems werden gemildert, wenn ein zusammenhängendes Sekundärnetz (Niederspannung) an passenden Stellen von Transformatoren gespeist wird, die auf der Primärseite an ein Hochspannungsnetz angeschlossen sind. Die Betriebsverhältnisse und das Schaltbild sind dann sehr ähnlich dem der Abb. 343, wenn man an den Speisepunkten den Transformator sich hinzudenkt. Das mit Hochspannung betriebene Speiseleitungsnetz ist besonders für große Leistungen billiger und ausdehnungsfähiger als die Speiseleitungen bei Niederspannung. Jetzt können nämlich die Transformatoren sich gegenseitig ergänzen, so daß ihre Gesamtleistung kleiner sein darf als bei Einzelanordnung; auch kann man jetzt ihre Anzahl verringern und dadurch größere Einheiten erhalten, wodurch der Wirkungsgrad steigt und der Preis, auf das kW bezogen, sinkt. Immerhin ist auch bei diesem System auf Verringerung der Leerlaufsverluste Bedacht zu nehmen, etwa dadurch, daß zur Zeit geringer Belastung (in den Sommermonaten, in den Tagesstunden usw.) ein Teil der Transformatoren mittels Schaltleitungen oder selbsttätig wirkender Apparate vom Netz abgetrennt wird.

(639) Überlandzentralen. Gebiete bis zu einem Radius von etwa 50 km mögen sich nach einem der Systeme (637) oder (638) mit einer Spannung von 15 oder 20 kV noch wirtschaftlich versorgen lassen. Die einheitliche Versorgung erheblich

weiter ausgedehnter Länderstrecken mit verschiedenartigen Verbrauchsgebieten (Landwirtschaft, Industrie, Städte, Bahnen usw.) bedingt jedoch ein anderes Verteilungssystem, nämlich die Anwendung sehr hoher Betriebsspannung (bis zu 130 kV) und eine zweifache Transformation. In der Zentrale wird hierbei der Strom zweckmäßig mit einer Hochspannung (z. B. 10 kV) erzeugt, die zur Verteilung in den nächstgelegenen Bezirken ausreicht; die Fernleitungen dagegen werden mit höherer Spannung gespeist (z. B. 50 kV), die in der Zentrale durch Transformation geschaffen wird. In Schalthäusern, die in den Versorgungsgebieten passend verteilt sind, wird der Strom wieder etwa auf die Zentralenspannung herabtransformiert und mit dieser den einzelnen Transformatorenstationen zugeführt, von deren Sekundärseite die Verteilungsnetze oder einzelne große Verbrauchsstellen mit Niederspannung gespeist werden. Solche Überlandzentralen entstehen neuerdings in großer Zahl zur Verwertung von Wasserkräften, Talsperren u. dgl., oder bei Dampfbetrieb in Verbindung mit Kohlenbergwerken oder in der Umgebung großer Industriezentralen. Das Schaltbild Abb. 355 stellt ein solches Verteilungssystem dar. Bei dem Kraftwerk *a* ist ein Schalthaus *b* errichtet,

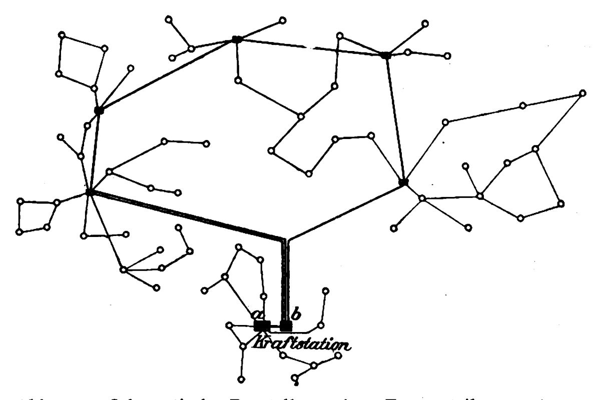


Abb. 355. Schematische Darstellung eines Fernverteilungssystems.

von dem die (stark gezeichneten) Fernleitungen ausgehen, die als Ringleitungen ausgebildet sind. Die einzelnen Hochspannungsnetze schließen sich an die durch Rechtecke angedeuteten Schalthäuser an, welche außer den Transformatoren die unerläßlichen Betriebseinrichtungen, wie Schalter, Überspannungsschutz, Blitzableiter, Reguliervorrichtungen usw. enthalten. Die im Schema durch kleine Kreise gekennzeichneten Transformatorenstationen der Hochspannungsverteilungsnetze versorgen sekundärseitig die im Schema nicht mehr gezeichneten Ortsnetze oder einzelne Großabnehmer mit der Gebrauchsspannung. Vgl. auch (767) u.f.

(640) Mehrphasensysteme. Alles in (636) bis (639) Gesagte gilt auch für die verschiedenen Arten von Mehrphasensystemen, insbesondere für den Drehstrom, der von allen Wechselstromsystemen bei weitem am meisten angewendet wird. Erwähnt sei, daß an Stelle von Mehrphasentransformatoren auch entsprechend miteinander zu verbindende Einphasentransformatoren verwendet werden können, was bisweilen aus räumlichen Gründen von Vorteil ist. Beim Drehstrom werden die Motoren und größeren Apparate an alle drei Phasen angeschlossen. Größere Lichtanlagen sind auf die drei Phasen möglichst gleichmäßig zu verteilen (Abb. 348, 349) derart, daß die einzelnen Lampenstromkreise nach dem Zweileitersystem (ev. mit blankem Mittelleiter) ausgeführt werden (632). Einseitige Belastung würde Spannungsverschiebungen im ganzen System und daher ungleichmäßiges Brennen

der Lampen zur Folge haben. Sollen Drehstromnetze mit neutralem Leiter (Abb. 349) in dieser Beziehung nicht gar zu empfindlich sein, so empfiehlt es sich, Transformatoren zu verwenden, die entweder Dreieck-Sternschaltung oder Doppelstern- oder Zickzackschaltung besitzen. Die in Deutschland fast durchweg verwendete Frequenz beträgt 50 Per/s mit Rücksicht auf den Betrieb von Glüh- und Bogenlampen, deren Licht bei niedrigeren Frequenzen unruhig wird. Für reinen Motorenbetrieb sind geringere Frequenzen günstiger, bei Bahnbetrieb geht man auf 25, ja sogar auf 15 Per/s herunter. Niedrige Frequenzen wären auch erwünscht wegen der Verminderung von Induktions- und Kapazitätswirkungen, welche störende Nebenerscheinungen hervorrufen können.

Die Wahl des Verteilungssystems hat einen gewissen Einfluß auf den Materialaufwand für das Leitungsnetz. So ist bei gleicher Lampenspannung (Verbrauchsspannung) und gleichem Energieverlust in der Leitung der Materialaufwand für dieselbe Anlage und bei gleicher zu übertragender Leistung bei Zweiphasensystem mit 4 Drähten ebenso groß wie bei Zweileiter-Gleichstrom, bei Zweiphasensystem mit 3 Drähten, wobei die drei Querschnitte sich verhalten wie die in ihnen fließenden Ströme, 72,9 % davon, beim Dreiphasensystem in Δ-Schaltung 75 %, bei Drehstrom in Sternschaltung mit neutralem Draht vom vollen Querschnitt der Außenleiter 33,3 % (Herzog u. Feldmann, Berechnung elektrischer Leitungsnetze). Solche Berechnungen haben jedoch nur bedingten Wert; ausschlaggebend für die Wahl eines Systems ist seine Leistungsfähigkeit, Betriebssicherheit und Einfachheit; die beiden letzten Forderungen hängen meistens eng miteinander zusammen und gewinnen um so größere Bedeutung, je ausgedehnter die Verteilungsanlage wird.

(641) Gefahren. Die Verwendung hochgespannter Elektrizität bedingt wie jede andere Energieform gewisse Gefahren für das mit der Bedienung solcher Anlagen betraute Personal. Streng genommen liegt die Gefahr nicht eigentlich in der Höhe der Spannung selbst, sondern in der Stärke des Stromes, den sie im Körper des Betroffenen erzeugt. Es kommt also neben der Spannung wesentlich auf die Größe des Widerstandes an, den der Körper des Betroffenen und dessen Aufstellungsort dem Strom bieten. Zweckmäßig angewendete Erdung einerseits, andererseits die Isolierung oder Erdung des Standortes des Bedienungspersonals sind wirksame Mittel, um die Gefahren zu verringern. Da die meisten Unfälle nicht durch Fehler der Anlagen, sondern durch Unvorsichtigkeit des Personals verursacht werden, so dienen eine übersichtliche Anordnung der Schaltanlagen, die Unterteilung durch Zwischenwände, Absperrung durch Drahtgitter sowie zweckmäßige Betriebsvorschriften nicht nur der Erhöhung der Betriebssicherheit, sondern zugleich als Schutz für das Personal, insofern dadurch die Berührung infolge augenblicklicher Unachtsamkeit erschwert wird.

Bei sehr hochgespannten Wechselströmen erhält auch eine gut isoliert aufgestellte Person bei Berührung nur einer Leitung durch Ladung elektrische Schläge.

Eine Gefahrenquelle, die sorgsam vermieden werden muß, besteht darin, daß die primäre Leitung Kontakt mit der sekundären erhält, wodurch bei Hinzutritt eines Erdschlusses der Niederspannungskreis unter Hochspannung gesetzt werden würde. Um diese Möglichkeit auszuschließen, bedient man sich besonderer Vorrichtungen wie Durchschlagssicherungen; vgl. (324).

Die Betriebsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker geben genaue Anweisung für die Unterhaltung und Bedienung elektrischer Starkstromanlagen.

Berechnung der Leitungen.

(642) Allgemeines. Größter und kleinster Querschnitt. Für die Berechnung der Leitungsquerschnitte sind die Rücksichten auf Erwärmung des Drahtmaterials einerseits und auf den im Interesse eines geordneten Betriebes zulässigen Spannungsverlust oder auf den aus wirtschaftlichen Gründen zulässigen Energieverlust anderseits maßgebend. Bei Leitungen, die mechanischen Beanspruchungen aus-

gesetzt sind, treten noch die an Festigkeit und Biegsamkeit zu stellenden Anforderungen hinzu. Selbständig verlegte Drähte unter 1 mm² Querschnitt sind im allgemeinen zu schwach und den Beanspruchungen der Montage und des Betriebes nicht gewachsen. Leiter von mehr als 1000 mm² Querschnitt sind zu steif, um sich aufrollen zu lassen, daher schwer zu transportieren und zu verlegen.

(643) Querschnitt und Erwärmung. Die Vorschriften des VDE lassen für isolierte Leitungen eine Erwärmung um 20° zu, so daß in Räumen mit einer Temperatur von 30° sich eine Höchsttemperatur der Leitungen von 50° ergibt (Passavant, ETZ 1907, S. 499). Entsprechend dieser zulässigen Erwärmung können unter normalen Verhältnissen isolierte Kupferleitungen und nicht im Erdboden verlegte Kabel aus Leitungskupfer wie folgt belastet werden:

Querschnitt mm²	Höchstzulässige Stromstärke A	Nennstromstärke für entspr. Abschmelzsicherung A	Querschnitt mm²	Höchstzulässige Stromstärke A	Nennstromstärke für entspr. Abschmelzsicherung A
0,75	9	6	95	240	190
1	11	6	120	280	225
1,5	14	10	150	325	260
2,5	20	15	185	380	300
4	25	20	240	450	350
6	31	25	310	540	430
10	43	35	400	640	500
16	75	60	500	760	600
25	100	80	625	880	700
35	125	100	800	1050	850
50	160	125	1000	1250	1000
70	200	160			

Für die Belastung von Freileitungen bestehen keine bestimmten Vorschriften; diese darf jedoch nur so weit getrieben werden, als die durch sie bedingte Erwärmung der Leitungen deren Umgebung nicht gefährdet.

Kabel, welche im Erdboden verlegt werden, können mit Rücksicht auf die hierbei eintretenden günstigeren Abkühlungsverhältnisse höher belastet werden, und zwar Einleitergleichstromkabel für Spannungen bis 750 V mit Kupferseele nach folgender Tabelle, welcher eine Erwärmung um ca. 25° zugrunde liegt.

Querschnitt mm²	Stromstärke A	Querschnitt mm²	Stromstärke A	Querschnitt mm²	Stromstärke A
1,0	24	35	210	310	785
1,5	31	50	260	400	910
2,5	41	70	320	500	1035
4	55	95	385	625	1190
6	70	120	450	800	1380
10	95	150	510	1000	1585
16	130	185	575		
25	170	240	670		

Für Kabel anderer Art, Mehrleiterkabel usw. bestehen ähnliche Belastungstabellen (siehe Normalien für isolierte Leitungen des VDE). Bei Mehrleiterkabeln kann in erster Annäherung die Summe der zulässigen Ströme für alle Adern zusammen gleich dem zulässigen Strom eines Einleiterkabels angenommen werden, dessen Kupferquerschnitt gleich der Summe der Querschnitte der einzelnen Seelen des Mehrfachkabels ist.

Obige Tabelle gilt unter der Annahme, daß nicht mehr als zwei Kabel in einem Graben zusammengelegt sind; bei Anhäufung von Kabeln in einem Graben, bei Verlegung der Kabel in Luft oder unter ähnlichen ungünstigen Verhältnissen, wodurch die Wärmeabführung leidet, empfiehlt es sich, die Belastung auf etwa $^3/_4$ der in der Tabelle angegebenen Werte herabzusetzen.

Bei Betrieben, welche starken Belastungsschwankungen unterliegen, können die Momentanwerte der Strombelastung die Höchstwerte obiger Tabellen zeitweise überschreiten, wenn dadurch keine größere Erwärmung als bei der der Tabelle entsprechenden Dauerbelastung entsteht. Keinesfalls darf hierbei aber die der Leitung vorgeschaltete Sicherung stärker bemessen werden als der Tabelle entspricht.

Für Leitungen aus anderem Material (Eisen, Aluminium, Zink usw.) ist bei gleichem Querschnitt (also auch gleicher abkühlender Oberfläche) der Strom so zu ermäßigen, daß die erzeugte Wärme und damit auch die Temperatur denselben Wert behält wie bei Kupfer, also in dem Verhältnis wie die Wurzeln aus den beiden spezifischen Leitwerten. Der für Kupfer ($\varrho=0{,}0175$) zulässige Strom ist daher mit folgenden Faktoren zu multiplizieren: bei Aluminium ($\varrho=0{,}03$) mit 0,77; bei Zink ($\varrho=0{,}06$) mit 0,54; bei Eisen ($\varrho=0{,}14$) mit 0,35.

Die Bemessung des Querschnitts nach der Erwärmung ergibt im allgemeinen nur seinen Mindestwert; meistens muß er mit Rücksicht auf Spannungsverlust oder Wirtschaftlichkeit größer gewählt werden; vgl. die folgenden Abschnitte.

(644) Querschnitt und Spannungsverlust. Der erforderliche Querschnitt einer unverzweigten Leitung ist abhängig von ihrer Länge, der Leitfähigkeit des verwendeten Metalles, dem zulässigen Spannungsverlust und der die Leitung durchfließenden Stromstärke.

Bedeutet q den zu ermittelnden Querschnitt in mm², l die e i n f a c h e Länge der Leitung in m (Entfernung von Anfang bis Ende der Leitungsstrecke), e den zugelassenen Spannungsverlust in Volt für beide Leitungen (Hin- und Rückleitung) zusammen, I die Stromstärke in Ampere, χ die Leitfähigkeit, so ist beim Gleichstrom-Zweileitersystem

$$q=\frac{2l\cdot I}{\chi\cdot e}\,.$$

Für die meisten Berechnungen genügt es, bei Kupfer als Leitfähigkeit den abgerundeten Wert 60 einzusetzen. Für andere Metalle sind Werte von $\chi=\frac{1}{\varrho}$ auf S. 49 und 50 zu finden; vgl. (643).

D r e i l e i t e r s y s t e m. Beim Gleichstrom-Dreileitersystem, wo der Mittelleiter die Differenz der Außenleiterströme führt, müssen bei genauer Rechnung die Spannungsverluste in jedem Einzelleiter für sich ermittelt und für jede Netzhälfte zusammengesetzt werden. Für die stärker belastete Netzhälfte addiert sich hierbei, wie aus Abb. 356 ersichtlich, der im Mittelleiter eintretende Verlust zu dem Verluste im Außenleiter; für die schwächer belastete Netzhälfte kommt dagegen ihre Differenz zur Geltung. Die Spannungen an den Enden des Dreileiters sind also für beide Netzhälften verschieden; bei sehr ungleicher Belastung, also starkem Verlust im Mittelleiter, kann in letzterem ein höherer Spannungsabfall eintreten als in dem schwächer belasteten Außenleiter. In diesem Falle ist auf der weniger belasteten Netzhälfte die Spannung am Ende der Leitung höher als an der Stromquelle.

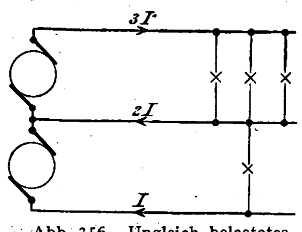


Abb. 356. Ungleich belastetes Dreileitersystem.

Meistens wählt man den Mittelleiter etwa halb so stark wie die Außenleiter. Nach dem Vorigen ist aber hierbei eine gewisse Vorsicht am Platze und Prüfung der Verhältnisse im Einzelfalle zu empfehlen.

Wechselströme. Die obige Gleichung für q ist auch bei Wechselstrom zutreffend, wenn die Leitungen nur Ohmschen Widerstand besitzen, d. h. von Selbstinduktivität und Kapazität praktisch frei sind und auch die Verbrauchseinrichtungen keine Phasenverschiebungen erzeugen (Glühlampen). Dabei sind für e und I die Effektivwerte einzusetzen. Erzeugen die Verbrauchseinrichtungen eine Phasenverschiebung φ zwischen dem Strome I und der Spannung am Ende der Leitung, so gilt angenähert:

$$q = \frac{2l \cdot I}{\chi \cdot e} \cdot \cos\varphi .$$

Besitzt eine Leitung Selbstinduktivität, so tritt zu dem Ohmschen Spannungsabfall e_r noch der sogenannte induktive Spannungsabfall hinzu, welcher von der Stromstärke und der Induktivität abhängt. Bedeutet f die Frequenz, L die Selbstinduktivität, so ist der induktive Spannungsabfall, der senkrecht auf dem Stromvektor steht,

$$e_i = 2\pi f L I .$$

Der gesamte Spannungsabfall e_g ergibt sich nach der Gleichung

$$e_g = \sqrt{e_r^2 + e_i^2}$$

Abb. 357. Geometrische Ermittelung des Spannungsabfalls bei induktiver Leitung.

als die geometrische Summe der in ihrer Phase um 90° verschobenen Komponenten, graphisch dargestellt als die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks, dessen Katheten der Ohmsche und der induktive Spannungsabfall bilden (Abb. 357).

Da aber dieser Spannungsabfall e_g in der Phase im allgemeinen gegen die Leitungs-Spannung verschoben ist, so wird der Spannungsverlust e, d. h. der Unterschied zwischen den Spannungen am Anfang und am Ende der Leitung, angenähert nur: $e = I R \cos\varphi + 2\pi f L I \sin\varphi$, woraus dann leicht R und damit q folgt.

Hierin hat φ dieselbe Bedeutung wie vorhin. R ist der Gesamtwiderstand der Leitung $= \frac{2l}{q \cdot \chi}$.

Im allgemeinen gewinnt der induktive Spannungsabfall bei kurzen Leitungen nur dann merkbaren Einfluß, wenn sie magnetische Apparate, Drosselspulen u. dgl. enthalten; bei langen Leitungen genügt auch schon ihre eigene Induktivität, um einen Spannungsabfall hervorzurufen, der weit größer ist als der aus dem reinen Leitungswiderstand errechnete[1]).

Auf Induktionswirkung beruht auch eine eigentümliche Erscheinung, die als Stromverdrängung oder Hautwirkung (Skineffekt) bezeichnet wird. Sie tritt bei stärkeren massiven Kupferleitern, besonders bei höheren Frequenzen in die Erscheinung, weit stärker aber noch bei Eisenleitungen, vgl. (99,4). Der Strom verteilt sich hierbei nicht gleichmäßig über den vollen Querschnitt, sondern wird mehr nach dem Umfang hingedrängt, wodurch eine scheinbare Erhöhung des Ohmschen Widerstandes und eine Vermehrung von Spannungsabfall und Stromwärme bedingt wird (siehe F. Rusch, ETZ 1908, S. 1079 und VDE, Druckschrift Nr. 163 vom Juni 1919, „Bestimmungen für die Übergangszeit", S. 4 u. f.).

Bei sehr hohen Spannungen gewinnt auch die Kapazität der Leitungen Bedeutung, d. h. ihre Eigenschaft, eine elektrische Ladung anzunehmen ebenso wie

---

[1]) Näheres siehe in Dr. Breitfeld, „Berechnung von Wechselstromfernleitungen" oder Zipp, „Berechnung elektrischer Leitungsnetze".

ein Kondensator. Diese Ladung ändert sich bei Wechselstrom mit der Spannung. Ladung und Ladespannung sind durch die Gleichung $Q = E . C$ verbunden, worin Q die Ladung bezeichnet, E die Ladespannung und C die Kapazität der Leitung. Wird eine mit Kapazität behaftete Leitung an eine Wechselstromquelle angeschlossen, so findet eine periodische Ladung und Entladung statt, es fließt in der Leitung ein unter Umständen beträchtlicher Strom, auch ohne daß Verbrauchsapparate an sie angeschlossen sind. Dieser gegen die Spannung E um 90° voreilende Ladestrom von der Größe $2\pi f C E$ ist bei der Berechnung der Leitung unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung (geometrisch) zu dem Verbrauchsstrom zu addieren und diese Summe ist als Gesamtstrom I in die vorigen Gleichungen einzusetzen, wobei jetzt φ den Winkel zwischen diesem Gesamtstrome und der Leitungsspannung E bedeutet. Hierbei ist angenommen, daß die Kapazität am Ende der Leitung konzentriert sei, während sie in Wahrheit sich über die ganze Leitungslänge verteilt. (Andere Näherungsmethoden in den zitierten Büchern sowie Rößler, ETZ 1905, ferner vgl. Kapp, ETZ 1891 und Cohn, ETZ 1911, S. 114).

Bei Mehrphasensystemen empfiehlt es sich zur Vermeidung von Irrtümern, den Spannungsabfall in jedem Draht oder Seil (Seele) einzeln zu berechnen und daraus unter Beachtung der Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Spannungen den Gesamtabfall in bezug auf die Gebrauchsspannung zu ermitteln.

(645) Abnahme der Spannung längs eines einseitig gespeisten Leitungsstranges mit Abzweigen. Der Spannungsverlust bis zu einem bestimmten Punkte eines solchen Leitungsstranges ist gleich der Summe der Spannungsverluste, vom Anfang des Leiters ab gerechnet; der maximale Spannungsverlust am Ende der Leitung ist sonach für eine einzelne Ader (Draht, Seil, Seele, Pol, Phase) bei Gleichstrom:

$$e_m = \sum_1^m \frac{I_n \cdot l_n}{q_n} \cdot \varrho \text{ (Abb. 358) oder auch } e_m = \sum_1^m \frac{i_n \cdot L_n}{q_n} \cdot \varrho \text{ (Abb. 359)}$$

Hierin bedeutet: I die Stromstärke in den einzelnen Abschnitten der Hauptleitung, i die Abzweigströme, L die Längen vom Speisepunkt bis zum Abzweigpunkt, l die Längen der Abschnitte der Hauptleitung, q die zugehörigen Querschnitte. Die zweite Formel gilt nur, wenn der Leitungsquerschnitt auf der ganzen Länge unverändert bleibt.

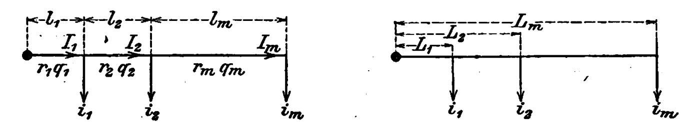


Abb. 358 u. 359. Abzweigungen von einem offenen Leitungsstrange.

Bei einem Zweileiter-Gleichstromsystem ist der gesamte Spannungsverlust doppelt so groß, wenn, wie üblich, in allen Abschnitten der Querschnitt beider Leitungen untereinander gleich ist.

Wenn der Leitungsquerschnitt auf der ganzen Länge unverändert bleibt, was oft zutrifft, so berechnet sich der Querschnitt aus dem für eine Ader zugelassenen Spannungsverlust e_m nach den Formeln:

$$q = \frac{\sum_1^m (I_n \cdot l_n)}{e_m} \cdot \varrho \quad \text{oder} \quad q = \frac{\sum_1^m (i_n \cdot L_n)}{e_m} \cdot \varrho .$$

Wenn mit der geringsten Menge an Leitungsmetall ausgekommen werden soll, müssen nach Müllendorf die Querschnitte q_n in den einzelnen Abschnitten

sich verhalten wie die Wurzeln aus den in ihnen fließenden Ströme; sie lassen sich aus folgender Formel berechnen:

$$q_n = \frac{\varrho}{e_m} \sqrt{I_n} \cdot \sum_1^m (l_n \cdot \sqrt{I_n}).$$

Darin bedeutet e_m wieder den Gesamtspannungsabfall in einer Ader über die ganze Länge L_m.

(646) Schwerpunktsprinzip. Wenn längs einer Leitung an verschiedenen Stellen Ströme abgenommen werden, so kann man für die Zwecke der Leitungsberechnung sich diese sämtlichen Einzelabnahmen durch eine einzige Abnahme ersetzt denken, deren Stromstärke gleich der Summe aller einzeln abgenommenen Ströme ist. Unter Anwendung der Bezeichnungen nach Abb. 358 ergibt sich der Widerstand der Leitung bis zu dem gesuchten Punkte, wo der Ersatzstrom abfließt, zu:

$$\sum_1^m (I_n \cdot r_n) \text{ dividiert durch } \sum_1^m i.$$

Statt $(I_n r_n)$ kann man mit Bezug auf Abb. 360 auch $(i_n \cdot R_n)$ setzen.

Bei konstantem Querschnitt über die ganze Länge wird der Abstand des Angriffspunktes dieses Ersatzstromes vom linken Leitungsende:

$$\sum_1^m (i_n \cdot L_n) \text{ dividiert durch } \sum_1^m i.$$

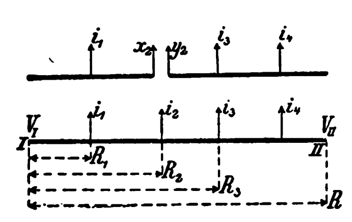


Abb. 360. Schematische Darstellung der Schnittmethode.

Der gesuchte Punkt stellt dann also den „Schwerpunkt" des Systems dar, wenn man die i als Gewichte und die L als ihre Hebelarme betrachtet.

(647) Stromkomponenten. Wenn in einem beliebigen Punkte eines von beiden Enden X und Y gespeisten Leiters ein Strom i abgenommen wird, so fließen der Abnahmestelle (unter Voraussetzung gleichen Potentials an den beiden Leiterenden) von den beiden Seiten die Anteile (Komponenten) x bzw. y zu; $(x+y=i)$. Sind r_x und r_y die Widerstände der Leitungsstrecken von der Abnahmestelle bis zu den Enden und R ihre Summe, so gilt $x = ir_y/R$ und $y = ir_x/R$, genau wie bei der Verteilung einer Einzellast auf die beiden Stützpunkte eines horizontalen Balkens. Haben die Endpunkte des Leiters verschiedene Potentiale V_x und V_y, so lagert sich über die Ströme x und y noch der Ausgleichsstrom $(V_x - V_y)/R$. Werden längs der Leitung mehrere Ströme i_1, i_2, i_3, i_4 abgegeben (Abb. 360), so berechne man nach (646) den Widerstand bis zum Angriffspunkt des Ersatzstromes, wobei man Speisung von nur einem Ende, etwa dem linken, annehmen kann, und verteile dann den Ersatzstrom auf die beiden Speisepunkte I und II. So ergibt sich der von II in den Leiter fließende Strom zu $\frac{1}{R}\sum_1^4 (i_n R_n)$; der von I zufließende Strom ist die Differenz gegen Σi. Ein etwaiger Potentialunterschied $V_I - V_{II}$ ergibt wieder einen übergelagerten Ausgleichsstrom $(V_1 - V_2)$: R, der den von II kommenden Strom verringert, den von I kommenden vergrößert.

Dieses Prinzip gestattet die von Herzog und Feldmann eingeführte Verlegung der Belastungen auf die Knotenpunkte und dadurch eine Vereinfachung der Berechnung der Stromverteilung in einem mehrfach geschlossenen Netze.

Aus den von I und II in den Leiter fließenden Strömen ergeben sich die in den einzelnen Teilstrecken fließenden Stromstärken und derjenige Abzweigpunkt,

an dem die Ströme von beiden Seiten zusammenfließen, sowie die Größe der hier von links und rechts zufließenden Teilströme, die zusammen den hier abzweigenden Verbrauchsstrom bilden. An diesem Abzweigpunkt kann man sich, ohne die Stromverteilung zu ändern, den Leiter durchgeschnitten denken, wobei der hier abzweigende Verbrauchsstrom in die eben erwähnten beiden Teilströme gespalten wird. Dann ergibt sich der Spannungsabfall von *I* oder von *II* bis zu dieser Stelle nach (645). Beide Abfälle müssen gleich sein, was zur Kontrolle der Rechnung dienen kann.

(648) Die **Schnittmethode** von Herzog ist die älteste Methode zur Berechnung eines geschlossenen Netzes (ETZ 1890, S. 221, 445). Man denkt sich jede von zwei Seiten gespeiste Verteilungsleitung (Abb. 360) an einer bestimmten beliebig gewählten Anzapfstelle (in der Abb. bei i_2) derart aufgeschnitten, daß auch der betreffende Abzweigstrom i_2 in zwei Teile x_2 und y_2 zerfällt und daß der linke Teil der Leitung (einschließlich x_2) lediglich von *I*, der rechte mit y_2 lediglich von *II* Strom empfängt. Dann drückt man die im Schnittpunkt herrschende Spannung zweimal aus, indem man einmal von *I*, das andere Mal von *II* ausgeht, und setzt beide Ausdrücke einander gleich.

Werden die Potentiale in *I* und *II* mit V_I und V_{II} bezeichnet, so folgt die Gleichung

$$V_I - (x_2 R_2 + i_1 R_1) = V_{II} - [y_2(R - R_2) + i_3(R - R_3) + i_4(R - R_4)].$$

Beachtet man, daß $x_2 + y_2 = i_2$ ist und setzt $V_I - V_{II} = v$, so erhält man

$$x_2 = \frac{v}{R} + i_2 + i_3 + i_4 - \frac{\sum_1^4 (i_n R_n)}{R}.$$

Ergeben sich x_2 und y_2 beide positiv, so ist die Abnahmestelle i_2 wirklich der Punkt, an dem die Ströme von beiden Seiten zusammenfließen. Andernfalls ergibt sich bei Einzeichnung der Ströme x_2 und y_2 unter Beachtung der Vorzeichen leicht die übrige Stromverteilung ohne neue Rechnung; der richtige Schnittpunkt, zugleich der Punkt niedrigsten Potentials, ist dann die Stelle, wo zwei entgegengesetzte Komponentenströme sich zum Strom eines Abnehmers i_n zusammensetzen.

Ist die Leitung ein in sich geschlossener Ring mit nur einer Stromzuführung, so fallen I und II zusammen und es ist $V_I = V_{II}$.

Es ist zu beachten, daß die Gleichungen für eine Ader abgeleitet sind und daß also v den Spannungsabfall in einer Ader bedeutet, ebenso R die Widerstandswerte für eine Ader.

Um ein ganzes Leitungsnetz zu behandeln, denke man sich jede Masche in einem beliebig gewählten Verzweigungspunkt so aufgeschnitten, daß das Netz in lauter offene Teile zerfällt, und daß kein Leiterstück ohne Zusammenhang mit der Zentrale bleibt. Der Stromverlauf ist dann überall eindeutig; man nimmt für jede Masche einen Strom als unbekannte gerichtete Größe an und drückt alle übrigen durch diesen aus, wobei man Richtungspfeile in das Strombild einzeichnet. Für jede Masche läßt sich nun die Gleichung aufstellen, die besagt, daß die Summe der aus Strom (unter Beachtung der angenommenen Richtungen!) und Widerstand sich ergebenden Spannungsverluste für alle Leiterstücke der Masche zusammen gleich Null ist. Aus diesen Gleichungen ergeben sich die Unbekannten und daraus die übrigen Ströme. Negative Werte besagen, daß der Strom umgekehrt fließt wie der angenommene Pfeil zeigt. Die wahren Schnittpunkte der einzelnen Maschen, d. h. diejenigen, in denen man das Netz aufschneiden kann, ohne die Stromverteilung zu ändern, findet man, soweit man sie nicht zufällig von vornherein richtig getroffen hat, indem man prüft, wo die wirklichen Ströme von beiden Seiten zusammenfließen. Für die wahren Schnittpunkte berechnet man die Zahlenwerte der Spannungsverluste.

Energieverluste in der Leitung und Wirtschaftlichkeit eines Netzes.

(649) Verlust im Leitungsnetz. Die in einer Leitung vom Widerstande R durch einen Strom I erzeugte Wärmemenge beträgt nach (61) in der Sekunde $0{,}239\, I^2 R$ Grammkalorien. Die dieser Wärmemenge gleichwertige elektrische Arbeit muß in den Dynamomaschinen des Kraftwerkes erzeugt werden; da sie ohne praktischen Nutzen an die Umgebung abgegeben wird, stellt sie einen Betriebsverlust dar. Dieser Verlust durch Stromwärme läßt sich durch Verringerung von R, also durch Verwendung stärkerer Leitungen vermindern; diese bedingen aber höhere Anlagekosten, die verzinst und getilgt werden müssen, wodurch die Jahres-Ausgaben sich wieder erhöhen. Zwischen den beiden Extremen: schwachen Leitungen mit größerem Verlust, aber geringerem Anlagekapital einerseits, und starken Leitungen mit hohen Anlagekosten, aber geringem Betriebsverlust anderseits ist im Einzelfalle die richtige Mitte zu finden, d.h. diejenige Bemessung der Leitungen, bei der die Gesamtkosten für Betriebsverluste, Verzinsung und Tilgung zusammengenommen ein Minimum ergeben.

Die während eines bestimmten Zeitraumes, etwa innerhalb eines Jahres, in der Leitung durch Stromwärme verlorene elektrische Arbeit ist gegeben durch den Ausdruck

$$\int I^2 \cdot R \cdot \mathrm{d}t .$$

Wird darin I in Ampere, R in Ohm, t in Stunden eingesetzt, so ergibt sich der Jahresverlust in Wattstunden. Dieser Gesamtverlust ist leicht zu ermitteln, wenn die übertragene Leistung über das ganze Jahr nahezu konstant bleibt, wie bei manchen chemischen Betrieben, Mühlen usw., oder sich nach einem bestimmten Stundenplan gesetzmäßig ändert (Bahnen, Spinnereien, Straßenbeleuchtung usw.).

Bei unregelmäßig schwankenden Betrieben muß man nach den Erfahrungen an ähnlichen Betrieben den wahrscheinlichen zeitlichen Verlauf der Belastung in Tages-, Monats- und Jahresbetriebskurven zu schätzen versuchen. Zeigen die Kurven für jede Stunde des Jahres den voraussichtlichen Stromwert i und ist I sein Höchstwert, so bilde man für jede Stunde das Verhältnis $\left(\frac{i}{I}\right)^2$ und bezeichne die Summe dieser Quadrate über das ganze Jahr mit T:

$$\sum \left(\frac{i}{I}\right)^2 = T .$$

Der Jahresverlust in der Leitung ist dann so groß, als ob die Leitung während T Stunden mit dem Strome I, während der übrigen Zeit gar nicht belastet wäre, er beträgt also

$$T \cdot I^2 \cdot R \text{ Wattstunden} .$$

(650) Wirtschaftlicher Spannungsverlust. Nach Ermittlung des Wertes T (649) lassen sich die gesamten jährlichen Betriebskosten für die Übertragung elektrischer Arbeit durch Leitungen als Funktion des Leitungsquerschnittes q darstellen.

Da $R = \varrho l/q$, so ist die im Jahre verlorene Energiemenge

$$\frac{T \cdot I^2 \cdot \varrho \cdot l}{1000 \cdot q} \text{ Kilowattstunden} .$$

Betragen die Kosten von 1 kWh m Mark, so ist der Wert des Jahres-Energieverlustes

$$\frac{\varrho \cdot m}{1000} \cdot T \cdot I^2 \cdot \frac{l}{q} \text{ Mark} .$$

(Hier ist zu beachten, daß m nur bei Bezug des Stromes nach Zählertarif [620] einen ohne weiteres bekannten Wert hat. Bei Bezug nach Gebührentarif [622] oder bei Selbsterzeugung des Stromes sind hier nicht die Durchschnittskosten der kWh einzusetzen, sondern nur der zusätzliche Kilowattstundenpreis

bzw. die beweglichen Betriebsausgaben der Stromerzeugung. Die Grundtaxe bzw. die festen Kosten der Stromerzeugung sind dann besonders zu berücksichtigen und mit der durch den Leitungsverlust zur Zeit der Höchstbelastung bedingten Erhöhung des Höchstbedarfs an Kilowatt zu multiplizieren.

Die Anlagekosten der Leitung lassen sich bei größeren Querschnitten in erster Annäherung darstellen durch $l \cdot (aq+b)$; der Klammerausdruck bedeutet hierin die Kosten von 1 m Leitung, a hängt wesentlich ab von dem Preis des Leitungsmetalles, und b ist eine von der gewählten Isolation und der Verlegungsart abhängige Konstante. Rechnet man nun für Verzinsung, Abschreibung und Reparaturen einen bestimmten Teil Z des Anlagekapitals, so sind die gesamten jährlichen Betriebskosten der Übertragung:

$$\frac{\varrho \cdot m}{1000} \cdot T \cdot I^2 \cdot \frac{l}{q} + Z \cdot l(aq+b) \text{ Mark.}$$

Dieser Ausdruck wird ein Minimum für:

$$q_r = \sqrt{\frac{\varrho \cdot m}{1000} \cdot T \cdot I^2 \cdot l \cdot \frac{1}{Z \cdot l \cdot a}} = I \sqrt{\frac{\varrho \cdot m \cdot T}{1000 \cdot Z \cdot a}}.$$

Die Größe $\sqrt{\frac{\varrho \cdot m \cdot T}{1000 \cdot Z \cdot a}}$ gibt diejenige Zahl, mit der die Höchststromstärke I (in Ampere) zu multiplizieren ist, um den wirtschaftlichen Leitungsquerschnitt (in mm^2) zu erhalten. Letzterer ist abhängig von dem Charakter des betreffenden Betriebes (T), den Kosten der Stromerzeugung (m), dem Preise und der Leitfähigkeit des Leitungsmaterials (a und ϱ), endlich von der Jahresquote für Verzinsung, Unterhaltung und Abschreibung (Z).

Aus dem wirtschaftlichen Querschnitt q_r läßt sich auch ein wirtschaftlicher Spannungsverlust berechnen, nämlich

$$e_r = I \cdot \varrho \cdot \frac{l}{q_r} = l \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot Z \cdot a \cdot \varrho}{m \cdot T}}.$$

Bei jeder Durchführung einer derartigen Berechnung ist indessen nachzuprüfen, ob der errechnete wirtschaftliche Querschnitt auch technisch ausreicht. Genügt er nicht den Rücksichten auf die Temperaturerhöhung (643) oder schwankt der Spannungsverlust dabei stärker, als es die Rücksicht auf Lampen und Motoren gestattet, so ist er entsprechend zu erhöhen. Oft empfiehlt sich ein größerer Querschnitt schon im Hinblick auf späteres Anwachsen des Stromverbrauches, da spätere Änderungen meist mit erheblichem Kostenaufwand verbunden sind.

Wo die mathematische Lösung nicht anwendbar ist, wird man die gesamten jährlichen Ausgaben bei verschiedenen Querschnitten ermitteln (von denen meistens nur wenige überhaupt in Betracht kommen) und danach unter diesen den zweckmäßigsten wählen.

(651) Entwurf eines Leitungsnetzes. Der Platz der Zentrale oder des Hauptversorgungspunktes wird meistens durch die örtlichen Verhältnisse von vornherein gegeben sein. Die Grundlagen für das Leitungsnetz müssen durch Konsumaufnahme, d. h. Umfrage nach der voraussichtlichen Stromentnahme, Vertragsabschluß mit den wichtigsten Stromabnehmern und durch Schätzung gewonnen werden.

Das Verteilungsnetz wird in allen denjenigen Straßen verlegt, wo zahlreiche Abnehmer vorhanden oder bestimmt zu erwarten sind. Bezüglich der Wahl der Querschnitte der Verteilungsleitungen verfahre man nicht allzu ängstlich und sehe für Zunahme des Verbrauches, besonders auch für das Hinzutreten weiterer Motoren, hinreichende Reserve vor, weil zu große Sparsamkeit bei dem ersten

Entwurfe später im Betriebe Schwierigkeiten hervorrufen oder teure Verstärkungsarbeiten bedingen kann.

Das Verteilungsnetz wird maßstäblich in einen Straßenplan eingezeichnet, die Belastungen werden an den Abzweigepunkten mit Angabe ihrer Höchstleistung eingetragen, event. unter Angabe des Verwendungszweckes. In Straßen mit vielen Hausanschlüssen empfiehlt es sich, beide Straßenseiten mit Verteilungsleitungen zu belegen, um die teuren Überwege zu sparen. Die Betrachtung eines gut dargestellten Verteilungsnetzes ergibt ohne umständliche Rechnung die geeigneten Stellen für die Speisepunkte, deren Wahl hauptsächlich durch die Lage der größeren Abnehmer bestimmt wird. Hierauf schneidet man nach (647) oder (648) die Leitungen auf und überträgt die Stromentnahme auf die Kreuzungspunkte der Verteilungsleitungen und schließlich auf die Speisepunkte, um deren Belastung zu erhalten.

Alsdann berechnet man die Spannungsverluste im Verteilungsnetze von den Speisepunkten bis zu den einzelnen Hausanschlüssen. Früher wurden hierfür höchstens etwa 2% zugelassen. Maßgebend hierfür war die Änderung der Lichtstärke der Glühlampen bei Schwankungen der Spannung; da Motoren eine größere Ungleichmäßigkeit zulassen, und die Metallfadenlampen von Änderungen der Spannung weit weniger beeinflußt werden als Kohlenfadenlampen, wird man jetzt einen etwas höheren Spannungsverlust, etwa 3%, wählen dürfen.

D i e S p e i s e p u n k t e des Netzes, an denen die Spannung konstant gehalten wird, sind für ihre Umgebung, ihr Versorgungsgebiet, als Stromquelle zu betrachten. Sie unterstützen sich gegenseitig und erhalten einen gewissen Belastungsausgleich durch die sie verbindenden Verteilungsleitungen. Die geeigneten Stellen für Speisepunkte sind Straßenkreuzungen, an denen wichtige Verteilungsleitungen zusammenlaufen. Nach stark belasteten Abnahmestellen werden zuweilen besondere Speiseleitungen geführt, die in dem betreffenden Grundstück abtrennbar sind und dasselbe nötigenfalls unabhängig vom Verteilungsnetz versorgen können (Theater, Warenhäuser usw.). Ausführlichere Betrachtungen siehe T e i c h m ü l l e r, Die elektrischen Leitungen, ferner A. S e n g e l, ETZ 1899, S. 807, und H e r z o g u. F e l d m a n n, Leitungsnetze.

Nach jedem Speisepunkt führt eine S p e i s e l e i t u n g, die im allgemeinen nicht verzweigt ist. Verfolgen mehrere Speiseleitungen auf eine längere Strecke den gleichen Weg, so kann man sie bei gleichmäßigem Spannungsabfall als Sammelleitungen zusammenfassen; indessen vermeide man, einer solchen Sammelleitung ein zu großes Versorgungsgebiet anzuvertrauen, damit im Falle eines Fehlers die Störung nicht zu weit greift. Besondere Sorgfalt ist der Austrittsstelle der Speiseleitungskabel aus der Zentrale zuzuwenden; hier muß jede Leitung sorgfältig geschützt frei durch das Mauerwerk geführt werden (glasierte Tonrohre); im Erdboden sind die Leitungen gruppenweise zu ordnen und möglichst auseinanderzuziehen, damit an keiner Stelle mehr Speiseleitungen als nötig zusammen liegen. Auch auf mechanischen Schutz durch Abdeckung ist hier besonderer Wert zu legen.

Der in den Speiseleitungen zugelassene höchste Spannungsverlust beträgt etwa 10—15%. Kurze Speiseleitungen müssen durch Vorschaltung besonderer Widerstände künstlich verlängert werden, damit sie den gleichen Spannungsverlust erreichen wie die längeren Leitungen (627).

Ist ein Leitungsnetz nach obigen Gesichtspunkten entworfen, so führe man eine Kontrollrechnung durch nach (650) und ändere, soweit hiernach zweckmäßig und möglich.

Von großer Wichtigkeit ist die dauernde Kontrolle eines in Betrieb befindlichen Netzes durch Spannungs- und Strommessungen während der Zeit der Höchstbelastung, im allgemeinen in den Wintermonaten von 4—6 Uhr abends. Diese Messungen geben den sichersten Anhalt für die weitere Verstärkung und den Ausbau des Netzes entsprechend der Anschlußbewegung.

(652) Berechnung von Hausinstallationen. Um ein Gebäude mit Elektrizität ausreichend zu versorgen, ist zunächst der Bedarf in den einzelnen Räumen zu ermitteln; die Lampen, Motoren und sonstigen Verbraucher werden alsdann in Grundrißzeichnungen der einzelnen Stockwerke eingetragen. Hierauf setzt man die geeigneten Stellen für Verteilungstafeln und Zähler fest und bestimmt den zweckmäßigsten Weg für die Hauptleitungen; die Einführungsstelle in das Haus (Hausanschluß) wird im allgemeinen von dem Stromlieferer (Elektrizitätswerk) angegeben. Die Glühlampen werden in Gruppen von höchstens 6 A Verbrauch zusammengefaßt (§ 14^7 der Errichtungsvorschriften des VDE) und an die Sicherungen der Verteilungstafeln angeschlossen. Außer bei besonders großen Beleuchtungskörpern empfiehlt es sich nicht, mehr als 10—15 Lampen zu einem Stromkreise zusammenzufassen, auch wenn die genannte Vorschrift es zuließe.

Die Zentralisierung der Sicherungen ist erwünscht, jedoch gehe man darin, besonders bei großen Installationen, nicht zu weit, da sonst durch die große Zahl der von den Verteilungstafeln ausgehenden Leitungen die Installation verteuert und die Übersicht erschwert wird. Lieber vergrößere man die Zahl der Verteilungstafeln. Die zu letzteren führenden Haupt- oder Steigeleitungen berechne man im allgemeinen auf konstanten Querschnitt. Man strebe bei dem ganzen Entwurfe danach, für die elektrische Installation die gleiche Einfachheit zu erreichen, wie sie für Gasleitungen bekannt ist; jedenfalls wähle man die Hauptleitungen nicht zu schwach und halte sich stets vor Augen, daß die Elektrizität nicht allein der Beleuchtung dient, sondern auch für Kraft, Heizung usw. immer weitere Verwendung findet. Über die bei Einrichtung eines Grundstückes zu beachtenden Grundsätze siehe die Leitsätze des VDE für die Herstellung und Einrichtung von Gebäuden bezüglich Versorgung mit Elektrizität.

Die Ausrechnung der Spannungsverluste, die nur angenähert zu sein braucht, geschieht am besten mit dem Rechenschieber. Bei Verwendung von Metallfadenlampen und voller Belastung der Anlage wird man mit einem Höchstverlust von 2—3 % rechnen dürfen. Für größere Anlagen mit verschieden gearteten Verbrauchsstellen ist hierbei jedoch anzunehmen, daß höchstens ein gewisser je nach den Verhältnissen des Einzelfalles zu schätzender Prozentsatz aller Lampen usw. gleichzeitig benutzt wird.

Bei Dreileiter- und Drehstromanschlüssen achte man auf sachgemäße Verteilung der einzelnen Stromkreise auf die verschiedenen Netzhälften oder Phasen, derart, daß die gleichmäßige Belastung zu allen Betriebszeiten gewahrt bleibt, und daß wichtige größere Räume nicht ausschließlich von einer Netzhälfte oder Phase gespeist werden.

Man vermeide bei den Hauptleitungen allzustarke Querschnitte (über ca. 100 mm²) und verlege lieber an Stelle einer starken mehrere schwächere Steigeleitungen; das erhöht die Betriebssicherheit und ergibt auch meistens Ersparnisse in bezug auf die Verteilungsleitungen.

Ausführung von Anlagen im einzelnen.

(653) Errichtungsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. Die praktischen Erfahrungen auf dem Gebiete der Installationstechnik sind in den vom VDE herausgegebenen Errichtungsvorschriften niedergelegt, mit deren weiterem Ausbau ein ständiger Ausschuß des VDE beschäftigt ist. — Neben den Vorschriften selbst werden ausführliche Erläuterungen[1]) herausgegeben. Eine wichtige Ergänzung der Errichtungsvorschriften bilden die ebenfalls vom VDE herausgegebenen Normalien und Prüfungsvorschriften. Während die behördlich anerkannten Errichtungsvorschriften ihrer Natur nach vorwiegend

[1]) C. L. Weber, Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen. Berlin, Julius Springer.



grundsätzliche Forderungen enthalten, ohne allzusehr in die Einzelheiten zu gehen, sollen die Normalien, dem jeweiligen Stand der Technik entsprechend, veränderlich und ausbaufähig sein.

Die Verbandsvorschriften behandeln Anlagen für Niederspannung und für Hochspannung. Hochspannungsanlagen erfordern in Anbetracht der mit ihrem Betrieb verbundenen induktiven und kapazitiven Erscheinungen und Vorgängen und in Anbetracht der Gefährlichkeit hochgespannter Ströme fast immer eine besonders eingehende technische Bearbeitung.

(654) Gefahren und deren Verhütung. Eine sachgemäße Installation hat im wesentlichen zu berücksichtigen die Feuersgefahr und die Einwirkung der Elektrizität auf den Organismus, wenn bei fahrlässiger oder zufälliger Berührung unter Spannung stehender Leiter oder Teile von Apparaten der Strom seinen Weg durch den menschlichen Körper nimmt. Feuersgefahr kann eintreten durch übermäßige Erwärmung der Leitungen oder Apparate durch den elektrischen Strom bei Eintritt eines Fehlers, wie Erdschluß oder Kurzschluß. Hiergegen bieten in Niederspannungsanlagen die Schmelzsicherungen und in Hochspannungsanlagen die selbsttätigen Höchststromschalter ein durchaus zuverlässiges Mittel, besonders, wenn die Anlage so angeordnet ist, daß ein etwaiger Isolationsfehler rasch zum Kurzschluß führt, so daß die fehlerhafte Leitung abgeschaltet wird.

Wenngleich die physiologischen Wirkungen niedrig gespannter Ströme im allgemeinen nicht gefährlich sind, so kann unter besonders ungünstigen Verhältnissen, wenn dem Stromdurchgang durch den menschlichen Körper ein geringer Widerstand geboten wird (Arbeiten in feuchten Räumen, Anfassen unter Spannung stehender Teile mit voller, feuchter Handfläche usw.) doch Gefahr bestehen. Der neuzeitliche Apparatebau strebt deshalb dahin, daß alle Teile, soweit sie unter Spannung stehen, der Berührung entzogen werden. In Hochspannungsanlagen müssen außerdem sämtliche an der Stromleitung unbeteiligte Metallteile geerdet sein, so z. B. die Gerüste der Schaltanlagen, die Handräder der Ölschalter, die Stützen der Isolatoren. Der Zweck der Erdung dieser Teile besteht darin, die Entstehung eines Spannungszustandes zwischen ihnen und der Erde unmöglich zu machen, so daß ein auf der Erde stehender Mensch sie ohne Gefahr berühren kann.

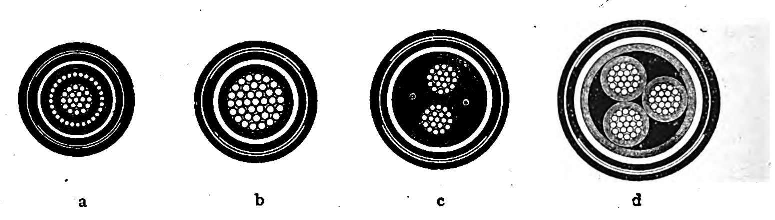
Kabelleitungen.

(655) Verlegungsarten. Bei Verlegung von Starkstromleitungen in dem Erdboden sind diese gegen chemische und mechanische Einflüsse zu schützen. Hierfür finden vorwiegend bandarmierte Bleikabel (656) Verwendung, die, sofern nicht besonders ungünstige Verhältnisse vorliegen, oder bei Erdarbeiten rücksichtslos mit der Picke gearbeitet wird, vollständigen Schutz bieten; von der Verwendung weniger gut geschützter Kabel ohne Bewehrung ist abzuraten, da chemische Einflüsse fast nie ganz ausgeschlossen werden können, und überdies ein gewisser mechanischer Schutz, wofür ein Bleimantel allein nicht ausreicht, immer notwendig ist.

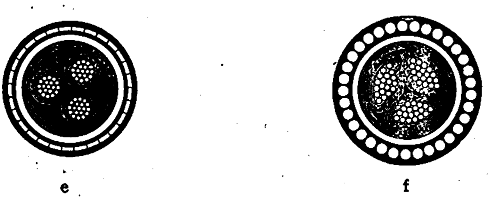
Kabelleitungen werden im allgemeinen mindestens 60 cm tief in das Erdreich verlegt; bei größeren Verteilungsnetzen kommen meistens die Verteilungsleitungen zu oberst zu liegen, da von diesen die Hausanschlüsse abgezweigt werden, darunter liegen die Speisekabel, welche nur im Falle einer Störung oder Untersuchung aufgenommen zu werden brauchen. Da jede Unterbrechungsstelle den Zustand der Gesamtleitung beeinträchtigt, sind Muffenverbindungen nach Möglichkeit zu vermeiden und möglichst große Kabellängen zu verwenden.

Nach der Verlegung schützt man häufig die Kabel noch durch Decksteine, Zementpanzer oder dgl.

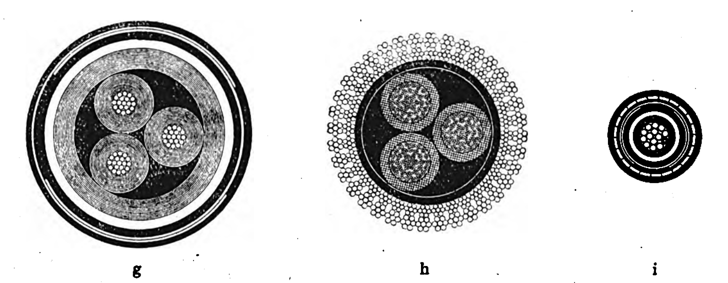
Mit der Verlegung unterirdischer Leitungen in Kanälen (Moniersystem) hat man keine günstigen Erfahrungen gemacht, da die Kanäle schwer vollständig trocken zu halten sind, überdies bei Erdarbeiten der Beschädigung unterliegen und, was das bedenklichste ist, bisweilen Gase in ihnen sich ansammeln, die bei



a Einadriges Bleikabel mit Eisenbandbewehrung.
b Konzentrische Zweileiterbleikabel mit Eisenbandbewehrung.
c Verseiltes zweiadriges eisenbandbewehrtes Bleikabel mit Prüfdrähten.
d Verseiltes dreiadriges bandbewehrtes Bleikabel.



e Verseiltes dreiadriges Bleikabel mit Bewehrung von flachen Eisendrähten.
f Verseiltes Drehstromkabel mit Leitern von sektorenförmigem Querschnitt mit Bleimantel und Bewehrung von runden Stahldrähten.



g Verseiltes Drehstrom-Hochspannungskabel mit Bleimantel und Eisenbandbewehrung.
h Drehstrom-Schachtkabel mit Bewehrung von litzenförmigen Eisendrähten.
i Einadriges Flußkabel mit Bleimantel und doppelter Bewehrung aus Eisenband und Flachdrähten.

Abb. 361. Kabelquerschnitte.

Funkenbildung Entzündungen und Explosionen herbeiführen können. Man ist deswegen von diesem System abgekommen. Günstiger sind eiserne Röhren, die eine fortlaufende Röhrenleitung bilden, in welche man bisweilen die Kabel einzieht. Das Röhrenleitungsnetz muß in diesem Falle aus lauter geraden Strecken

bestehen; wo eine Biegung erforderlich ist, wird ein Untersuchungs- und Einführungsbrunnen angelegt. Zum Zwecke des Einziehens wird beim Verlegen der Röhren ein verzinkter Eisendraht hineingebracht, an dem man darauf ein Drahtseil und mittels des letzteren das Kabel einzieht.

Die Reichstelegraphenverwaltung verlangt zum Schutze ihrer eigenen Anlagen bei der Herstellung elektrischer Starkstromanlagen (abgesehen von elektrischen Bahnen) die Beobachtung bestimmter Vorschriften, vgl. Anhang, Nr. 11, 12.

Hinsichtlich der unterirdischen Starkstromleitungen wird verlangt, daß diese von Telegraphenkabeln tunlichst entfernt gehalten werden und daß bei Kreuzungen ein nicht zu geringer Abstand eingehalten wird.

(656) Bauart der Kabel (Abb. 361a bis i). Als Leitermetalle werden verwendet: Kupfer, Aluminium, Zink und Eisen. Die Leiter der Bleikabel bestehen nur bei den kleinsten Querschnitten aus einem einzelnen Drahte, sonst aus einer größeren Zahl verseilter Drähte. Bei Gleichstrom wird jede Leitung in einem besonderen Kabel geführt, bei Wechsel- und Drehstromkabeln sind 2 bzw. 3 Leiter in einem Kabel entweder konzentrisch oder nebeneinander und verseilt angeordnet. Nach den Verbandsvorschriften dürfen konzentrische Kabel nur bei Spannungen unter 3000 V verwendet werden. Mit Rücksicht auf bessere Raumausnutzung erhalten die Leiter bisweilen nicht kreisförmigen, sondern sektorförmigen Querschnitt (Abb. 361 f), eine Anordnung, die indessen in elektrischer Hinsicht gegenüber dem Kreisquerschnitt der Leiter den Nachteil ungünstigerer elektrischer Beanspruchung der Kabelisolierung mit sich bringt. Die Isolierung der Leiter wird aus getränkter Jutefaser, neuerdings in gesteigertem Maße auch aus Papier (bei Hochspannungskabeln ausschließlich) hergestellt. Da, wo auf Zerstörung der Isolierung einwirkende Einflüsse besonders stark auftreten, wird auch vulkanisierte Gummiisolierung angewendet. Mitunter verwendet man auch abwechselnde Schichten verschiedener Isolierstoffe. Zum Schutze gegen Feuchtigkeit wird das isolierte Kabel mit einem nahtlosen Bleimantel umpreßt und dieser noch durch Asphaltanstrich und eine Lage geteerter und asphaltierter Jute geschützt. Zum Schutze gegen mechanische Beschädigungen dient, wenn erforderlich, noch eine Bewehrung aus 2 spiralförmig aufgewickelten Eisenbändern (Abb. 361a bis d und g), über denen sich nochmals eine Lage asphaltierter und geteerter Jute befindet, oder eine Bewehrung aus Eisendraht (Abb. 361 f, h und e) auch beide zugleich (Abb. 361 i).

G r u b e n - u n d S c h a c h t k a b e l (Abb. 361 h). Für diese Kabel ist eine besonders starke tragfähige Bewehrung erforderlich. Diese wird bei kleinen Kabelquerschnitten aus verzinkten Rundeisendrähten, bei größeren Querschnitten und bei Hochspannungskabeln aus verzinkten Flacheisendrähten hergestellt. Letztere bilden einen dicht schließenden Mantel für das ganze Kabel; bei Kabeln großen Querschnitts besteht auch die Bewehrung aus Drahtlitze.

F l u ß k a b e l (Abb. 361 i) besitzen gleichfalls eine besondere kräftige Bewehrung aus starken verzinkten Eisendrähten, außer der üblichen doppelten Eisenbandbewehrung.

(657) Zulässige Strombelastung der Bleikabel. Bei unterirdisch verlegten Kabeln sind die Voraussetzungen für die Ableitung der Stromwärme verhältnismäßig günstiger als bei sonstigen isolierten Leitungen. Sie können aus diesem Grunde bei gleichem Querschnitt höhere Ströme führen als diese. Indessen ist zu beachten, daß sich bei hohen Spannungen die durch die ständige Umelektrisierung der isolierenden Schichten entstehende zusätzliche Erwärmung bemerkbar macht, so daß die Belastungsfähigkeit der Kabel um so geringer ist, mit je höherer Spannung sie betrieben werden. Nachstehend sind die zulässigen Belastungswerte bei verschiedenen Spannungen und für die gebräuchlichen Leitermetalle zusammengestellt.

Querschnitt eines Leiters	Höchste dauernd zulässige Stromstärke in Ampere											
	Einleiter Bleikabel bis 750 V				Verseilte Dreileiterbleikabel bis 3 kV				Verseilte Dreileiterbleikabel bis 10 kV			
in mm²	Cu	Al	Zn	Fe	Cu	Al	Zn	Fe	Cu	Al	Zn	Fe
1	24	–	12	8	17	–	–	–	–	–	–	–
1,5	31	–	16	11	22	16	–	–	–	–	–	–
2,5	41	–	22	14	29	22	15	10	–	–	–	–
4	55	42	29	19	37	28	19	13	–	–	–	–
6	70	55	37	24	47	36	25	16	–	–	–	–
10	95	75	50	33	65	50	35	23	60	46	32	21
16	130	100	70	45	85	65	45	30	80	60	42	28
25	170	130	90	60	110	85	59	38	105	80	56	36
35	210	160	110	75	135	105	70	47	125	95	65	43
50	260	200	135	90	165	125	90	60	155	120	85	55
70	320	245	170	110	200	145	105	70	190	155	100	65
95	385	295	205	135	240	185	125	85	225	170	120	80
120	450	345	240	155	280	215	145	100	260	200	135	90
150	510	390	270	175	315	240	165	115	300	230	160	105
185	575	440	305	200	360	275	190	125	340	260	180	120
240	670	515	355	230	420	320	225	145	–	–	–	–
310	785	600	420	270	490	375	260	–	–	–	–	–
400	910	695	485	315	570	435	305	–	–	–	–	–
500	1035	795	555	360	–	–	–	–	–	–	–	–
625	1190	910	635	415	–	–	–	–	–	–	–	–
800	1380	1055	740	480	–	–	–	–	–	–	–	–
1000	1585	1210	850	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Verseilte Zweileiterbleikabel können mit einer um 12% höheren, dagegen verseilte Vierleiterbleikabel mit einer um 8% geringeren als in der Zusammenstellung für verseilte Dreileiterbleikabel angegebenen Stromstärke belastet werden.

Die angegebenen Stromstärken gelten nur bei Verlegung im Erdboden. Bei Verlegung der Kabel in Kanälen, in der Luft oder an Wänden empfiehlt es sich, die Belastung auf $^3/_4$ der angegebenen Werte zu ermäßigen.

(658) Kabelgarnituren. An allen Stellen, wo ein Kabel endet, in eine Haus- oder Freileitung übergeht oder mit einem anderen Kabel verbunden wird, muß besondere Sorgfalt auf sichere Verbindung und gute Isolierung der blanken Leiterteile verwendet werden; auch ist die freigelegte Kabelisolierung gut abzuschließen. Hierzu dienen die sogenannten Garniturteile:

Endverschlüsse (Abb. 362 a bis d). Die Enden der Kabelleitungen sind mit den Anschlußleitungen durch starke Verbindungsklemmen mittels Schrauben verbunden. Die Verbindung ist in einem gußeisernen Schutzbehälter untergebracht, der mit Isoliermasse vollständig ausgegossen wird.

Verbindungsmuffen (Abb. 363 a bis c). Die Kabelenden werden durch Schraubklemmen verbunden. Die Muffe besteht aus einem gußeisernen Kasten, der nach Herstellung der Verbindung mit Isoliermasse ausgegossen wird.

Abzweigmuffen (Abb. 364). An Stelle der Verschraubung der Leiterteile an Verbindungs- und Abzweigstellen mittels Verbindungsklemmen wird bisweilen auch die Verlötung angewandt, um unzulässige Erwärmung durch

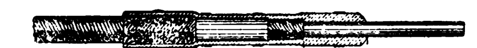


Abb. 362a. Einfacher Gummiendverschluß für Einleiter-Kabel.

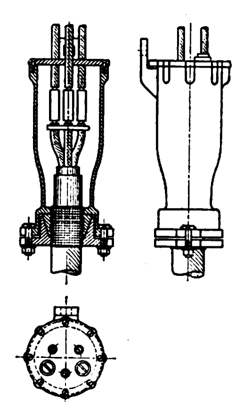


Abb. 362b. Endverschluß für Drehstromkabel bis 7000 V (AEG.)

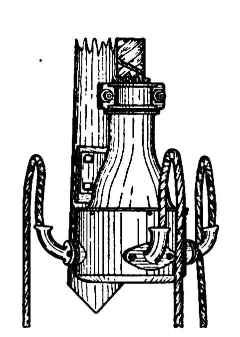


Abb. 362c. Überführungsendverschluß vom Hochspannungskabel zur Freileitung (AEG).

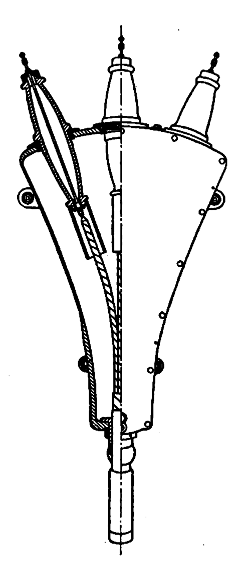


Abb. 362d. Endverschluß zu Drehstrom-Hochspannungskabel für 30000 V (AEG).

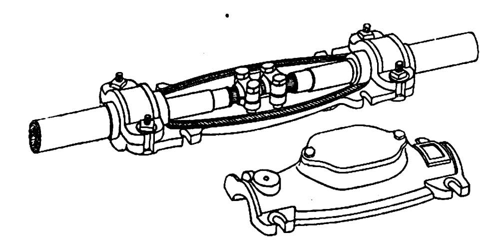


Abb. 363a. Verbindungsmuffe für Einleiter-Kabel (SSW).

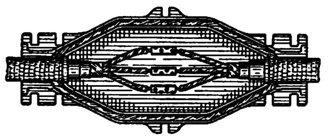


Abb. 363b. Verbindungsmuffe für dreifach verseilte Kabel (Land- und See-Kabelwerke).

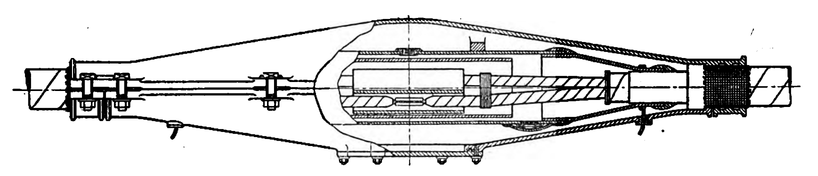


Abb. 363c. Verbindungsmuffe für Drehstrom-Hochspannungskabel 30 000 V (AEG).

schlecht ausgeführte Schraubenverbindungen auszuschließen. Die einzelnen Leiterteile müssen dann gespleißt und sorgfältig miteinander verlötet werden und auch die beiden Bleimäntel sind durch Verlötung zu verbinden; die Lötstelle wird hierauf durch eine Schutzkappe bedeckt. Das Lötverfahren erfordert ein sehr zuverlässiges und gut geschultes Arbeitspersonal.

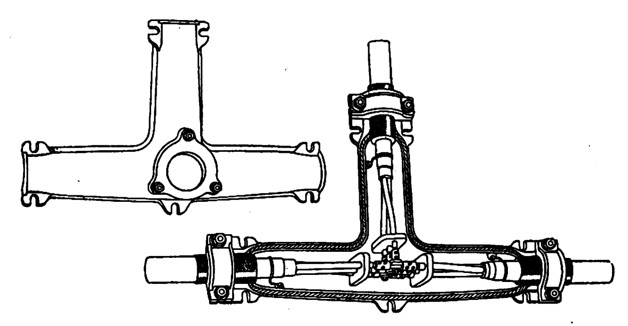


Abb. 364. Abzweigmuffe für dreifach verseilte Bleikabel bei 3 kV (AEG).

Die Verwendung sehr hoher Spannung erfordert besonders sorgfältige Durchbildung der Garniturteile und Vorsicht bei deren Montage (Abb. 362 d und 363 c). Die Durchführungen der Kabelseelen am Endverschlusse sind der hohen Spannung entsprechend als Porzellanisolatoren ausgebildet. Um bei der Montage die in die Kabelenden eingedrungene Luft zu entfernen, wird das mit den Bleimänteln verlötete bleierne Muffengehäuse auf ca. $1/_{10}$ mm Quecksilbersäule ausgepumpt. Auch die Füllung der Muffen erfolgt unter Vakuum.

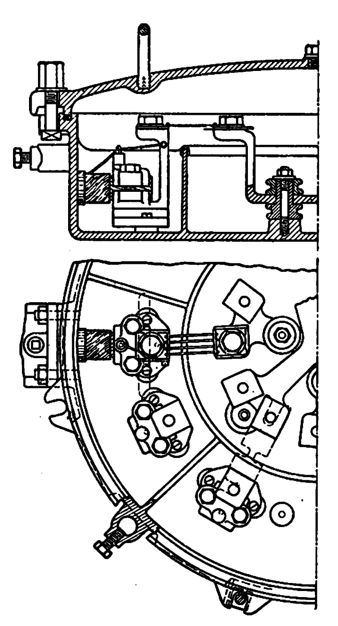


Abb. 365. Kabelkasten der SSW.

(659) Kabelkästen. An Vereinigungspunkten mehrerer Kabel verwendet man Kabelkästen, die auch Sicherungen für die einzelnen Leitungen enthalten können. Diese Kästen werden nicht ausgegossen, müssen aber äußerst sorgfältig gegen das Eindringen von Feuchtigkeit geschützt werden.

Bei dem Kabelkasten Abb. 365 erfolgt die Abdichtung durch Gummizwischenlagen zwischen Deckplatte und Kastenrand.

Abb. 366 zeigt einen Kabelkasten zur Einführung von 4 . 3 Einfachkabeln, die durch Silberdrahtschmelzeinsätze gesichert sind. Der Kasten wird durch eine Abdeckglocke nach Art einer Taucherglocke verschlossen, wodurch das Eindringen von Wasser in den Kasten ausgeschlossen ist.

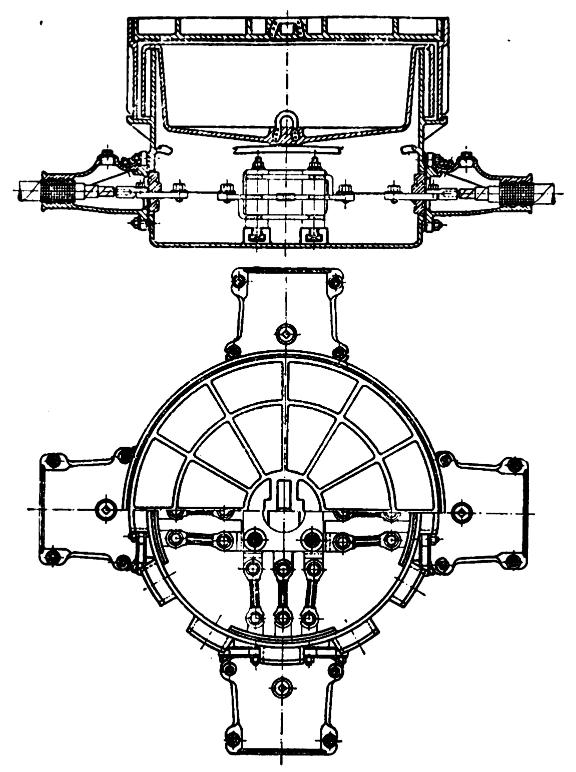


Abb. 366. Kabelkasten der AEG mit Abdeckglocke.

Freileitungen.

(660) Begriff und Verwendung. Nach den Begriffsfeststellungen in den Errichtungsvorschriften des VDE gelten als Freileitungen: Alle oberirdischen Leitungen außerhalb von Gebäuden, die weder metallische Schutzhülle noch eine Schutzverkleidung besitzen. Als Freileitungen sind nicht anzusehen Installationen im Freien an Gebäuden, in Höfen, Gärten u. dgl., bei denen die Entfernung der Stützpunkte weniger als 20 m beträgt.

Die Freileitungen, die selbst in kleineren Städten den Erdkabeln weichen mußten, haben durch die Ausbreitung der Überlandwerke wiederum eine erhöhte Bedeutung gewonnen, aber auch hier dürften sie nur die Vorstufe einer höheren Entwicklung bilden. Sie finden außer in den Hochspannungsnetzen der Überlandwerke auch in den Ortsnetzen der Dörfer und kleinen Städte sowie auf den Gütern ausgedehnte Anwendung und bilden in den weitaus meisten Fällen das wirtschaftlichste Mittel zur Fortleitung der elektrischen Energie. Da die Freileitungen allen atmosphärischen und mechanischen Einwirkungen ausgesetzt sind, ist ihre Betriebssicherheit eine bedingte, an deren Verbesserung unablässig gearbeitet wird.

(661) Maste und Leitungsträger. Als Träger der Verteilungsleitungen finden vorwiegend Holzmaste Verwendung. Sie werden aus gut gewachsenen Fichten, Lärchen oder Tannen in Länge von 7—14 m und Zopfstärken von 13—18 cm

geschnitten und unter Vakuum mit verschiedenen Imprägniermitteln getränkt. Es werden einfache (E) und doppelte oder Kuppelmaste (D) verwendet. Die Einbautiefen betragen bei

7	8	9	10	11	12	13 m	Mastenlänge
1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,9 m.	

Die Zopfstärken in cm errechnen sich nach Kinberg für imprägnierte E-Masten zu $Z=\sqrt[3]{580\cdot D\cdot H\cdot a+100\,H_1^2-H_1^3}-\frac{H_1}{2}$ und für imprägnierte D-Masten zu $Z=\frac{\sqrt[3]{580\cdot D\cdot H\cdot a+100\,H_1^2-H_1^3}}{5}-\frac{H_1}{2}$, wo $D=\Sigma$ der Drahtdurchmesser

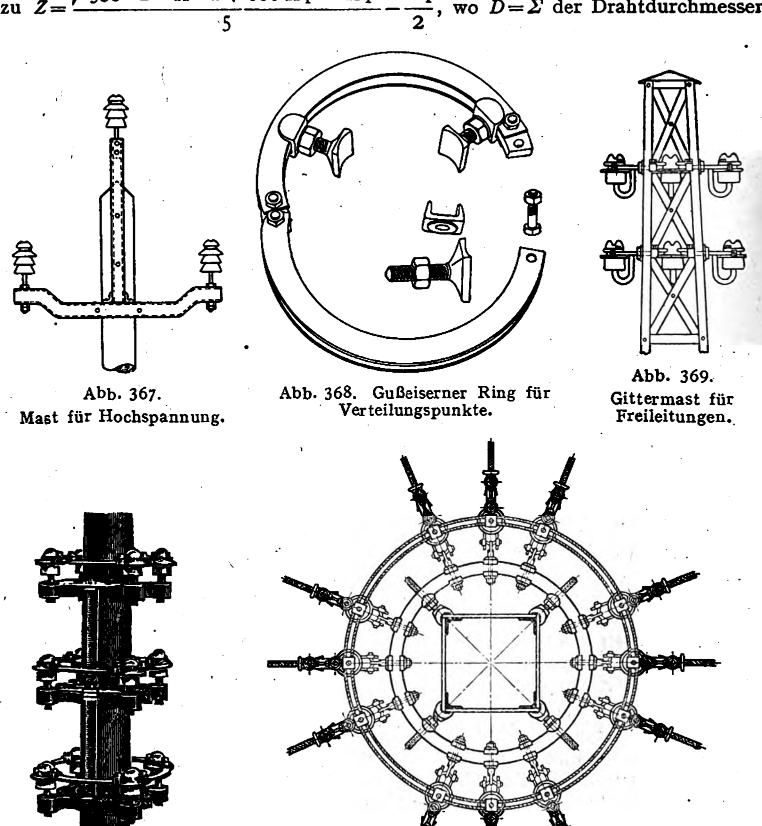


Abb. 367. Mast für Hochspannung.

Abb. 368. Gußeiserner Ring für Verteilungspunkte.

Abb. 369. Gittermast für Freileitungen.

Abb. 370. Holzmast für Freileitungen.

Abb. 371. Verteilungspunkt für Freileitungen am Gittermast.

in m, $H=$ mittl. Leitungshöhe über Erde, $H_1=$ Gesamthöhe, $a=$ Spannweite zwischen den Masten in m bedeuten. Die Stelle des Mastes, an der die verschiedenen Medien — Erde und Luft — sich berühren, ist am ehesten der Zerstörung ausgesetzt und daher sorgfältig zu überwachen. Bei humussäurehaltigem (Moor)-Boden werden Holzmaste auf besondere Schäfte aus Beton und Eisen gesetzt. Für wich-

tige (Speise-)Leitungen wählt man *U*- und ∢-Eisenmaste, Gittermaste oder Leitungstürme. Diese werden für einen bestimmten Spitzenzug berechnet. Die Eisenmaste besitzen eine bedeutend größere Lebensdauer als Holzmaste, bedürfen jedoch einer sorgfältigen Überwachung und öfteren Erneuerung des Anstriches. In den letzen Jahren finden auch Maste aus Eisenbeton von rechteckigem Querschnitt mit oder ohne Aussparungen und runde, innen hohle, sog. Schleudermaste vielfach Verwendung. Bei sachgemäßer Ausführung sind sie sehr haltbar und verursachen geringe Unterhaltungskosten. Die Eisenbetonmaste erhalten wie die Eisenmaste besondere Erdungsplatten. In kleineren Ortschaften werden auch

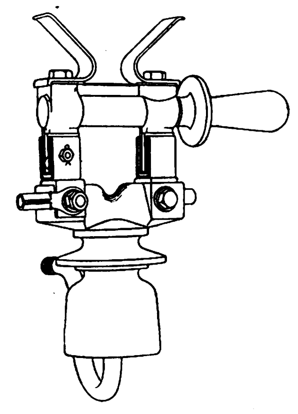
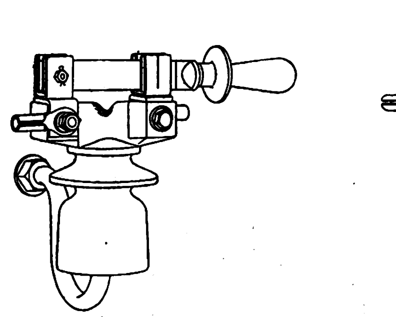


Abb. 372. Isolator mit ausschaltbarer Sicherung.



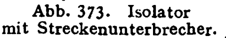


Abb. 373. Isolator mit Streckenunterbrecher.

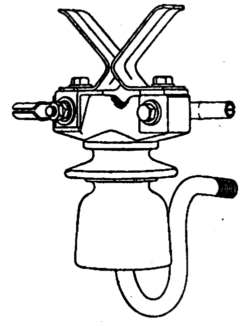


Abb. 374. Isolator mit Hörner-Funkenableiter.

Spezial-Glockenisolatoren für Apparate an Freileitungen.

Rohrmaste, Konsolen, Fahnenausleger, eiserne Dachständer oder Querseile zum Tragen der Niederspannungsleitungen benutzt. Die Vermittlung zwischen Mast und Isolator bilden die L e i t u n g s t r ä g e r. Bei Hochspannungsleitungen werden die eisernen Stützen entweder direkt am Mast befestigt oder auf Querarme aus *U*-Eisen aufgeschraubt. Die Querarme sind in der Nähe der Isolatoren zweckmäßig zu kröpfen, um den Abstand von Leitungen zum Eisen wegen der Vogelgefahr zu erhöhen (Abb. 367). Leitungstürme für mehrere Leitungen erhalten besonders ausgebildete Tragkonstruktionen insbesondere bei Anwendung von Hängeisolatoren.

Der Aufbau der Leitungsträger für Niederspannungsnetze ist verwickelter, da hier oft eine größere Anzahl Leitungen an einem Gestänge laufen oder von diesem abgezweigt werden. Auch darf hierbei die Wahrscheinlichkeit von Erweiterungen nicht außer acht gelassen werden. Besonders sorgfältige Ausbildung haben deshalb die Verteilungspunkte für N.Sp.-Freileitungen gefunden. Die Isolatoren hierfür werden an einem geteilten, gußeisernen Ring befestigt, der aufklappbar und mit einstellbaren Distanzstücken versehen ist, um ihn für runde und kantige Maste verschiedener Abmessungen verwenden zu können (Abb. 368). Die Isolatoren werden durch Verteilungsschienen oder Drahtseile untereinander verbunden (Abb. 369 bis 371). Zur Befestigung der Freileitungen an den Isolatoren dienen Kabelschuhe, bestehend aus einem Gußkörper, in dem die Anschlußverbindung durch einen Keil festgehalten wird. Eine den Zug aufnehmende Seilschleife wird in seitlichen konischen Aussparungen des Kabelschuhes befestigt. Besondere Formgebung erhalten die Abspannisolatoren, wenn sie gleichzeitig zur Unterbringung von Sicherungen, Ausschaltern oder Hörnerfunkenableitern dienen sollen (Abb. 372 bis 374). Bei dem von Astafieff ausgebildeten Verteilungssystem werden die Abspannisolatoren in einer Ringöse abgefangen, so daß

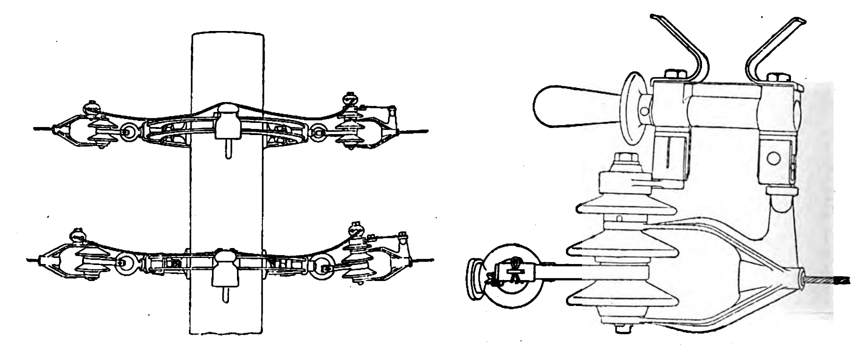


Abb. 375. Verteilungspunkt mit Abspannisolatoren.

Abb. 376. Abspannisolator mit ausschaltbarer Sicherung.

sie sich in Richtung des Zuges frei einstellen können. Die Ringösen können an Holzmasten sowie an Verteilungsringen Verwendung finden. Der Abspannisolator kann gleichzeitig auch für feste oder abschaltbare Abzweigsicherungen eingerichtet werden (Abb. 375 und 376). Die Anordnung hat den Vorzug, daß ein Bruch des Isolators durch falschen Zug oder das störende Verdrehen und Verbiegen der Isolatorenstützen nicht möglich ist.

Zum Festhalten von Seil- oder Drahtschleifen, sowie zu Abzweigungen und Verbindungen dienen, soweit eine Verlötung nicht erfolgt, besondere Universalklemmen und bei Hochspannungsfreileitungen Niet- oder Schraubverbinder (Abb. 377 und 378).

Zur Einführung von Freileitungen in Gebäude verwendet man da, wo diese nicht an den Außenwänden erfolgt, Dachständer mit besonderen Einführungsköpfen, bestehend aus einer Doppeltülle unter einer Regenhaube, die nach der Montage aufgesetzt wird. Die Zweiteiligkeit der Anordnung gestattet bequemes und unbeschädigtes Einziehen der Drähte sowie eine leichte Kontrolle der Montage (Abb. 379). Der Aufbau der Verteilungspunkte muß in besonders sorgfältiger Weise geschehen, wobei auf genügende Abstände, gute Befestigung und übersichtliche Anordnung zu achten ist. Auch hier sind sog. Provisorien durchaus unstatthaft, da sie sehr bald die Ursache von Störungen werden.

(662) Isolatoren und Stützen. Die Beschaffenheit der Isolatoren ist für die Betriebssicherheit der Freileitungsnetze von ausschlaggebender Bedeutung. Ihre Gestalt ist abhängig von der Höhe der Spannung, für die sie Verwendung finden sollen. Der Isolator soll nicht nur den mechanischen Druckbeanspruchungen auf

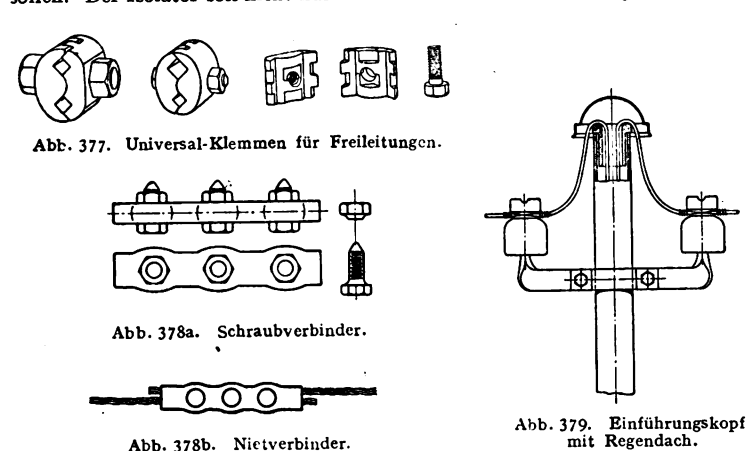


Abb. 377. Universal-Klemmen für Freileitungen.

Abb. 378a. Schraubverbinder.

Abb. 378b. Nietverbinder.

Abb. 379. Einführungskopf mit Regendach.

die Dauer standhalten, sondern auch den thermischen und elektrischen Einflüssen gewachsen sein. Um diesen Ansprüchen zu genügen, ist große Sorgfalt auf das zu verwendende Material, die Herstellung und Formgebung zu legen. Die an Isolatoren auftretenden Risse haben nach neueren Untersuchungen hauptsächlich Spannungen,

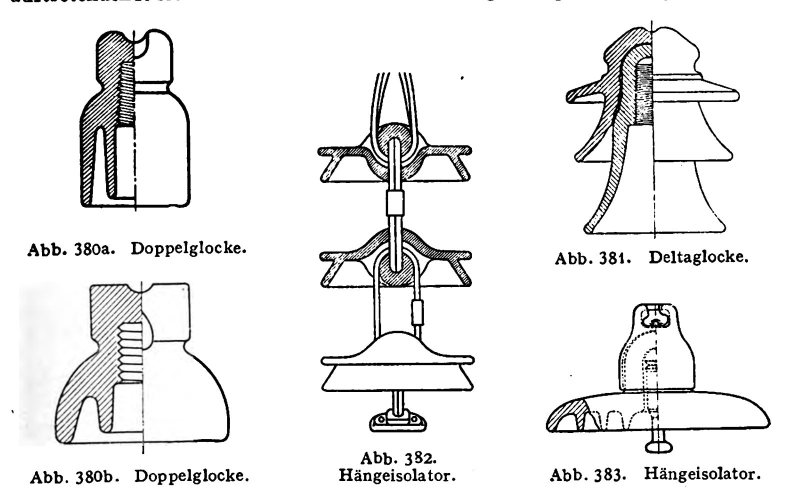


Abb. 380a. Doppelglocke.

Abb. 381. Deltaglocke.

Abb. 380b. Doppelglocke.

Abb. 382. Hängeisolator.

Abb. 383. Hängeisolator.

hervorgerufen durch die verschiedene Wärmeausdehnung von Porzellan und Kitt, ihre Entstehung zu verdanken. Für Schwachstrom und Niederspannung verwendet man aus einem Stück hergestellte Porzellan- oder Glasisolatoren von glockenförmiger oder mehr tellerförmiger Gestalt (Abb. 380 a und b). Die Herstellung geeigneter Hochspannungsisolatoren bot nicht unerhebliche Schwierigkeiten. Von den an-

fangs gebräuchlichen Ölisolatoren ist man vollständig abgekommen, verwendet vielmehr jetzt für Spannungen bis 50 kV sog. Delta-Isolatoren mit einem bis drei Zwischenmänteln je nach der Höhe der Spannung, und für noch höhere Spannungen Hängeisolatoren. Die Einfügung der Zwischenmäntel bezweckt eine Verhinderung der Oberflächenleitung durch Feuchtigkeit, Ruß, Staub u. dgl., eine Verlängerung des Kriechweges und die Vermeidung des Durchschlages bei Beschädigung eines Teiles des Isolators. Die Isolatoren mit Zwischenmänteln werden meist mehrteilig ausgeführt, um den Schwierigkeiten bei der Fabrikation und den auftretenden inneren Spannungen zu begegnen. Außerdem gewinnt der Isolator dadurch an Festigkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen. Zum Zusammenkitten der Isolatorteile verwendet man neuerdings Teleokitt (Abb. 381). Die Durchbildung der Delta-Isolatoren erscheint jedoch noch nicht abgeschlossen. Die Hängeisolatoren bestehen aus mehreren, untereinander verbundenen Einzelgliedern, deren oberstes die Aufhängevorrichtung trägt, während am untersten Glied die Leitung befestigt ist. Bei der Konstruktion der Hängeisolatoren wird angestrebt, daß bei Beschädigung eines Isolators durch Blitzschlag, Steinwurf u. dgl. die Leitung nicht herabfallen kann. Bei dem Hewlett-Isolator wird dies dadurch angestrebt, daß die einzelnen Teile durch Seilschlingen miteinander verkettet sind (Abb. 382). Die Porzellanfabrik Hermsdorf sucht dasselbe durch besondere Formgebung der den eigentlichen Isolator tragenden Konstruktionsteile zu erreichen, deren Zusammenhang auch gewahrt bleibt, wenn der Isolator beschädigt wird (Abb. 383). Die einzelnen Glieder werden für eine durchschnittliche Betriebsspannung von 20 kV hergestellt. Die Überschlagsspannung steigt jedoch nicht in demselben Verhältnis wie die Zahl der Einzelglieder, sondern ist um 10—30% geringer, und zwar infolge der ungleichen Verteilung des Ladestromes.

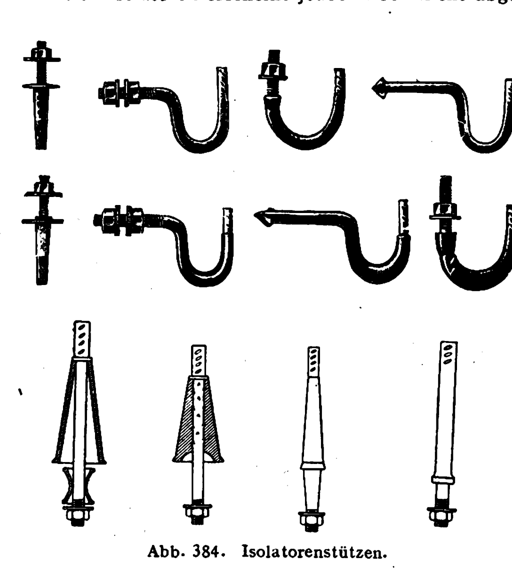


Abb. 384. Isolatorenstützen.

Für Delta-Isolatoren erhält man folgende Werte (Kalender für Elektrotechniker):

Betriebsspann. bis kV	3	6	12	24	35	50
Trocken-Überschlagsspannung in . kV	25—40	30—50	40—60	65—80	80—100	110—135
Regen-Überschlagsspannung bei 45° kV	20—30	25—35	30—45	50—60	60—80	85—100
Mechanische Prüfbelastung . . kg	1000	1500	2000	2500	3000	4000
Gewicht . . . . kg	0,3—0,4	0,4—0,6	0,9—1,2	1,5—2	2,3—3,5	4,5—7,5

Um die Isolatoren nicht von der Umgebung zu scharf abstechen zu lassen, werden sie zweckmäßig nicht mit weißer, sondern mit grüner, grauer oder brauner Glasur versehen.

Die Isolatoren werden auf eisernen Stützen befestigt, deren Form sich nach der Art der Leitungsträger (Holz-, Eisenmaste, Mauerwerk usw.) richtet (Abb. 384). Auf genügende Höhe und Ausladung der Isolatorenstützen ist schon mit Rücksicht auf die Vogelgefahr ganz besonderes Augenmerk zu richten. Um dem mechanischen Zug der Freileitungen Widerstand zu leisten, erhalten die Stützen, wo erforderlich, entsprechende Verstärkungen. Das Aufbringen der Isolatoren auf die Stützen geschieht mittels Hanf, der mit Leinöl oder Mennige getränkt wird, oder vermittels Papierhülsen. Das Aufkitten mit Schwefel ist unstatthaft, das mit Zement besonders in Amerika gebräuchlich. Die nachgiebige Schicht zwischen Isolator und Stütze soll ein Springen des Isolators verhüten und einen Ausgleich für die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Porzellan und Eisen schaffen.

(663) Leitungsdraht. Alle außerhalb der Gebäude verlegten und der Berührung entzogenen Drähte bedürfen keiner besonderen Isolierung, sondern werden blank verlegt. Als Material kommen Kupfer, Aluminium, Bronze und Eisen in Betracht. Das verwendete Kupfer muß elektrolytisch rein sein und den Kupfernormalien des VDE entsprechen. Für Leitungen bis zu 16 mm^2 wählt man Einzeldrähte, von da ab Seile (s. Normalien für Freileitungen des VDE). Die Verbindung der Cu-Leitungen erfolgt durch Verlötung, die von Zug entlastet sein muß, und durch Niet- oder Schraubverbinder.

Die Leitungen aus Aluminium haben in den letzten Jahren erhöhte Bedeutung gewonnen. Für Freileitungen werden, um genügende Festigkeit zu erreichen, nur Al-Seile verlegt. Der Al-Querschnitt beträgt für gleiche Leitfähigkeit das 1,65-fache des Cu-Querschnittes und das Gewicht die Hälfte desjenigen der gleichwertigen Cu-Leitung. Die Verbindungen der Al-Leitungen müssen besonders sorgfältig ausgeführt werden; es sind hierfür neuerdings eine ganze Anzahl besonderer Vorrichtungen konstruiert worden. Die Al-Leitungen besitzen gegenüber den Cu-Leitungen folgende Vorteile: Größere Oberfläche, bessere Kühlung, größere Belastbarkeit, größere Dehnungszahl, geringeres Gewicht und leichtere Gestänge, dagegen folgende Nachteile: Geringere Festigkeit, größeren Durchhang, größere Leitungsabstände, Weichheit des Materials und schwierigere Herstellung von Verbindungen. Bei größeren Querschnitten sind die Al- den Cu-Leitungen dagegen überlegen. Die Befestigung der Al-Leitungen an den Isolatoren erfolgt am einfachsten und besten durch Klemmbügel.

Bronzeleitungen finden infolge des hohen spez. Widerstandes geringe Verwendung; sie kommen hauptsächlich für kurze Strecken in Betracht, von denen eine erhöhte Festigkeit verlangt wird (Bahn- und Wegekreuzungen). Dagegen haben Eisenleitungen infolge der Kupfernot der letzten Jahre eine ausgedehnte Anwendung im Freileitungsbau gefunden, und zwar als Eisen- oder Stahldrahtseile. Es soll nur gezogener, gut verzinkter Draht verwendet werden, um Rostbildung zu vermeiden. Wenn der Spannungsabfall bei der Wahl des Querschnittes nicht maßgebend ist, kann man das 2,5 bis 3,5-fache des erforderlichen Cu-Querschnittes wählen. Bei Ausführung von Verbindungen an Eisenleitungen sind dieselben Vorsichtsmaßregeln wie bei den Al-Leitungen zu beobachten.

Zum Vergleich der verschiedenen Leitungsmaterialien diene folgende Tabelle:

	Cu. halbhart	Bronze	Alum.	Stahl
Spez. Gewicht.	8,95	8,9	2,7	7,95
Zerreißfestigkeit . kg/mm^2	30 – 38	50 – 68	17 – 20	60
Elastizitätsgrenze kg/mm^2	12	12,5 – 25	8 – 10	30
Spez. Widerstand 10^{-3} . .	17,2	18,7 – 28,7	28,74	138
Leitfähigkeit	58,1	35 – 53,5	34,8	7,25
Wärme-Ausdehnungs-koeffizient 10^{-6}	16,8	18	23,8	11,4

(664) Spannweite und Durchhang. Bei Niederspannungsanlagen wählt man gewöhnlich eine Spannweite von 40—60 m, schon um für Hausanschlußleitungen eine hinreichende Anzahl von Abzweigpunkten zu erhalten. Bei Hochspannungsleitungen geht man weit über diese Entfernung hinaus. Hierfür betragen die mittleren Mastabstände für Holzmaste 60—80 m und bei Eisenmasten 100—200 m. Für Spannungen von 100 kV liegt die günstigste Spannweite zwischen 200—240 m. Für Abzweigleitungen wählt man 40—60 m Mastenabstand. Alle 500 m soll bei Holzmasten ein verankerter (A) Mast und bei eisernen Masten alle 3 km ein Abspannmast gesetzt werden. Die gegenseitigen Abstände der Leitungen sollen bei Niederspannungetwa 40 cm, bei Hochspannung nach Petersen $d = 25+2{,}5\ P$ cm (P in kV) und nach Klingenberg gemäß folgender Tabelle betragen:

Spannweite	Leitungsabstände in cm										
	Netzspannung in kV										
	6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
bis 60 m	60	65	70	—	—	—	—	—	—	—	—
von 60—100 m	75	80	90	100	110	—	—	—	—	—	—
über 100 m	100	100	105	110	120	135	155	175	200	225	250

Nach der Spannweite ist der Durchhang der Leitungen zu bemessen. Die Freileitungsnormalien des VDE lassen für massive Kupferleiter einen Zug von 12 kg/mm², für Kupferseile von 16 kg/mm² und für Aluminiumseile von 7 (9) kg/mm² zu. Diese Beanspruchungen sollen weder bei —20° C. ohne zusätzliche Belastung, noch bei —5° C. mit einer zusätzlichen Eis- bzw. Windbelastung überschritten werden. Diese Zusatzlast ist gleich $0{,}180\sqrt{d}$ in kg für 1 m Leitungslänge einzusetzen. Die allgemeine Formel für die Berechnung des Durchhanges bei gleicher Höhe der Befestigungspunkte lautet: $f = a^2 \cdot g/8\, s \cdot q$, wo a = Spannweite in m, g = Gewicht des Drahtes in kg/m, s = Zugbeanspruchung des Drahtes in kg/mm² und q = Querschnitt des Drahtes in mm² bedeuten. Bei Berücksichtigung von Wind- oder Eislast tritt zu g die betreffende Zusatzbelastung hinzu. Da für jeden Querschnitt eine besondere Zusatzbelastung durch Wind- bzw. Eis zu berücksichtigen ist, muß für jeden Querschnitt eine besondere Tabelle berechnet werden. Derartige Montagetabellen sind im Anhang zu den Freileitungsnormalien enthalten. Die Einstellung des richtigen Durchhanges bei der Montage erzielt man dadurch, daß man die Durchhänge an den Masten von der Rille des Isolators aus abmißt, und die Leitung nach der durch diese Punkte festgelegten Visierlinie spannt, oder dadurch, daß man den bestimmten Zug mit einem Federdynamometer einstellt.

(665) Schutzvorrichtungen. Besondere Schutzvorkehrungen gegen Drahtbrüche sind notwendig, wenn Leitungen mit anderen parallel laufen, sich kreuzen, oder wenn Hochspannungsleitungen Ortschaften, Wege, Postleitungen oder den Bahnkörper überqueren. Für Niederspannungsleitungen werden hierfür besondere, wetterfeste isolierte Leitungen (Hackethal- und Pluviusdraht) verwendet.

Für Hochspannungsleitungen sind eine Anzahl Vorkehrungen gebräuchlich, die das Erden oder Stromloswerden der gerissenen Leitung bezwecken. Die früher allgemein gebräuchlichen Schutznetze werden ihrer Nachteile und Unkosten wegen nur noch selten ausgeführt. Zur Abtrennung dienen die Gouldschen und Hesseschen Kupplungen, bei denen die Leitungen nur durch den Zug der Drähte in besonders geformten Aufhängevorrichtungen an den Isolatoren gehalten werden. Äußerst sorgfältige Montage ist erforderlich, da sonst die Leitungen auch bei Sturm-, Schnee- und Eislast auslösen und herabfallen. Vielfach werden auch Erdungsbügel, die den gerissenen Draht auffangen und erden, angewendet. Bei deren Bemessung ist zu berücksichtigen, daß sie nicht zu weit von der Leitung abstehen, wodurch sie ihre Wirkung verfehlen, andererseits aber,

daß sie sich nicht zu nahe am Leitungsdraht befinden, damit Störungen durch Wind oder Vögel vermieden werden. Sind die zu kreuzenden Wege nicht zu breit, kann man die Maste so hoch wählen, daß die gerissene Leitung im ungünstigsten Falle 3 m über Straßenoberkante bleibt; gleichzeitig kann durch ein einfaches, unter der Leitung angebrachtes trapezförmiges Eisengestell für Erdung gesorgt werden. Neuerdings wird vielfach die bruchsichere Aufhängung bevorzugt und von den meisten Bahnverwaltungen vorgeschrieben. Diese erfolgt in der Weise, daß jeder Draht an den beiden Masten des Kreuzungspunktes durch je zwei oder drei Isolatoren abgespannt wird. Beim Schadhaftwerden eines Isolators wird der Draht durch die Abspannseile des oder der anderen Isolatoren gehalten (Abb. 385). Die Leitung darf bei Kupferseilen nur mit einer Zugspannung von 12 kg/mm², bei Kupferdrähten nur mit 8 kg/mm², bei Aluminiumleitungen nur mit 5 kg/mm² verlegt werden. Die preußischen Bahnverwaltungen schreiben Kupferseil von 35 mm² vor. Unterhalb der Leitungen ist ein geerdeter Prelldraht zu spannen. Bemerkenswert ist auch die bruchsichere Aufhängung von Ulbricht, bei der jede Leitung aus zwei an gesonderten Isolatoren befestigten Leitungsseilen mit Querverbindungen besteht. Jede Leitung bildet ein schmales Netz, das wagerecht angeordnet von der Bahn aus schmal erscheint. Bei Bruch eines Seiles erhält das Netz eine schon aus der Ferne erkennbare Schrägstellung. Die Verbindungen an diesen Netzen werden nicht durch Lötung, sondern durch Nietverbinder hergestellt. Bedingung bei allen diesen Vorrichtungen ist eine unbedingt gute Erdung der betreffenden Masten und Schutzvorkehrungen. Zum Schutze gegen Erdschlüsse durch Vögel verwendet man Porzellanklemmen, die über die Leitungen in der Nähe des Isolators geschoben werden, oder besonders ausgebildete Traversen, die keine Sitzgelegenheit für Vögel abgeben. Die Vogelgefahr läßt sich bereits durch richtige Abmessung der Abstände der Leitungen von den Eisenteilen stark herabmindern.

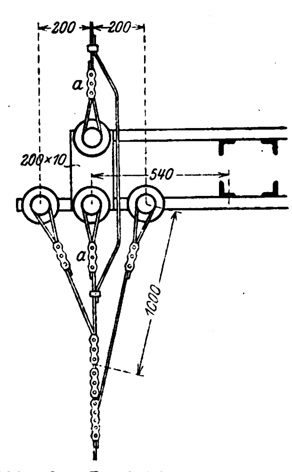


Abb. 385. Bruchsichere Aufhängung.

Literatur: W. v. Moellendorf, Verwendung versch. Metalle f. Freileitungen. ETZ 1910, S. 44. — G. Klingenberg, Verteilung elektr. Energie über große Gebiete. ETZ 1913, S. 698. — W. Petersen, Der Schutzwert von Blitzseilen. ETZ 1914, S. 1. — Fr. W. Esch, Verwendung von Eisenleitungen als Ersatz von Cu- bzw. Al.-Leitungen. ETZ 1915, S. 185. — J. Sumec, Graph. Bestimmung d. Zugbeanspruchungen v. Freileitungen. ETZ 1915, S. 327. — S. Wächter, Rasche Bestimmung d. Durchhangsänderungen v. Freileitungen. ETZ 1916, S. 429. — Sparstoffe. ETZ 1916, S. 561. — H. Hamy, Freileitungen aus Al. ETZ 1917, S. 241. — Gg. Horstmann, Üb. d. wirtschaftl. Ausnutzung v. Hochsp.-Leitungen. ETZ 1918, S. 193. — W. Wittek, Üb. d. Eisbelastung d. Freileitungen. ETZ 1918, S. 475.

Fröhlich, Beitrag zur Berechnung von Mastfundamenten. Ztschr. f. Bauwesen 1915, Heft 10—12. — Kommission f. Errichtungs- u. Betriebsvorschriften. ETZ 1919, S. 41. — F. Kapper, Freileitungsbau-Ortsnetzbau. Verlag R. Oldenbourg.

Leitungen in Innenräumen.

(666) Isolierung der Leitungen. Für Starkstromleitungen finden fast ausschließlich gummiisolierte Drähte Verwendung, deren Gummischicht mit einer Umhüllung aus faserigem, mit isolierenden Stoffen durchtränktem Material umgeben ist. Ersatz s. (668).

Leitungen, welche betriebsmäßig geerdet sind, wie die geerdeten Mittelleiter von Gleichstrom-Dreileitersystemen, bedürfen streng genommen keiner Isolierung und werden zuweilen auf ihrem ganzen Wege blank verlegt (632). Da indessen auch in den Mittelleitern und Nulleitern Ströme und dementsprechend geringe Spannungen auftreten, ist bei solchen blanken, unisoliert verlegten Leitungen eine gewisse Vorsicht gegen elektrolytische Einwirkung geboten, die an feuchten Stellen zur Zerstörung der Leitungen führen kann, vornehmlich wenn die Befestigungsmittel (Krampen usw.) aus einem anderen Metalle als Kupfer bestehen.

Leitungs- und Installationsmaterial.

(667) Leitungsnormalien. Für die wichtigsten Leitungsarten sind vom VDE Normalien festgelegt worden, auf Grund deren ihre Herstellung von sämtlichen Fabriken in gleicher Weise erfolgt. Alle normalisierten Leitungen erhalten auf Grund der zwischen den Herstellern, dem VDE und der Vereinigung der EW getroffenen Vereinbarungen als Kennzeichen in der über der Gummischicht befindlichen Faserumhüllung einen weißen Faden, ferner als Ursprungszeichen für den Erzeuger einen oder mehrere farbige Fäden, die stets zu einer anderen Zusammenstellung miteinander verdrillt werden. Diese Normalien schließen die Fabrikation anders isolierter Leitungen nicht aus, ebensowenig wie die Verwendung von Leitungsquerschnitten, die in der Normalientabelle nicht enthalten sind; sie sollen vielmehr lediglich für bestimmte, am häufigsten gebrauchte Materialien feste, von dem Belieben des Herstellers möglichst unabhängige Qualität gewährleisten und in den nach den Verbandsvorschriften herzustellenden Anlagen Verwendung finden.

Wegen der großen Bedeutung, welche der Qualität und Reinheit des zur Isolierung vorwiegend verwendeten Gummis beigemessen werden muß, sind Vorschriften über die Zusammensetzung und Beschaffenheit des zu verwendenden Gummis festgelegt. Näheres hierüber enthalten die neuesten Verbandsnormalien, giltig vom 1. 7. 1915, welche über die Bauart, Prüfung und Verwendung der verschiedenen Leitungen genauen Aufschluß geben. Diese Normalien schließen die früher viel benützten Gummi*band*leitungen aus und fordern hierfür ausschließlich Gummi*ader*leitungen (mit nahtloser Gummihülle).

Normalisiert für *feste Verlegung* sind ferner noch Spezialgummiaderleitungen (z. B. für Hochspannung), Rohrdrähte und Panzeradern, *für Beleuchtungskörper*: Fassungsadern und Pendelschnüre, *für den Anschluß ortsveränderlicher Stromverbraucher*: Gummiaderschnüre, Werkstattspezialschnüre, Hochspannungsschnüre und Leitungstrossen; schließlich *für Erdkabel*: Gummibleikabel, Papier oder Faserstoffbleikabel für die verschiedenen Stromarten mit Kupfer oder Aluminiumleitern.

(668) Ersatzstoffe. Der Krieg mit seinem für Deutschland eintretenden Mangel an Rohstoffen, insbesondere an Kupfer und Gummi zwang zur sparsamsten Benutzung dieser Stoffe und der Verwertung von Ersatzstoffen. Als Isolierstoff wurde besonders Papier, durch eine isolierende Lösung getränkt, mit gutem Erfolg verwendet.

Für besondere Räume mit ätzenden Dünsten (Ställe, Waschküchen, chemische Fabriken u. dgl.) wurden auch früher schon Drähte mit Papierbandumwicklung und Faserumspinnung verwendet, welche mit gegen Säuren und Alkalien widerstandsfähigen Mitteln (Bleimennige) getränkt und überzogen sind.

An Metallen für die Leitungsadern kamen hier in Betracht: Aluminium, vorwiegend aber Zink und teilweise auch Eisen. An Stelle von Gummi trat regenerierter Kautschuk und in hervorragendem Maße imprägniertes Papier. Die äußere Umspinnung mußte ferner aus Mangel an Baumwolle und Jute durch Papiergarn ersetzt werden. Für alle aus diesen Metallen und Isoliermaterialien hergestellten Leitungen wurden baldigst Normalien aufgestellt, so für gummiisolierte Aluminium-,

Zink- und Eisenleitungen, für Leitungen mit imprägnierter Papierisolierung, für Panzeradern mit Aluminium- und Zinkleitern usw. Diese Ersatzleitungen haben den an sie gestellten Forderungen durchaus entsprochen, nachdem die Eigenheiten der verwendeten Stoffe sowohl bei der Herstellung als auch bei der Verlegung der Leitungen gebührend berücksichtigt wurden. Sie werden daher auch in Zukunft wohl dauernd, mindestens aber in der jetzigen Übergangszeit mit Ausnahme von Eisenleitungen in größerem Maße in Verwendung bleiben, wobei jedoch Zink durch Aluminium verdrängt werden dürfte.

(669) Leitungen außerhalb der Normalien. Hackethaldrähte. Hackethal verwendete schon seit langer Zeit statt blanker Leitungen an Stellen, wo solche wegen Kreuzungen von Schwachstromleitungen oder gegen zufällige Berührung isoliert sein mußten, Kupferdrähte mit Baumwolle oder Jute umklöppelt, welche mit einer Imprägniermasse aus Leinöl und Mennige getränkt waren. Diese Drähte fanden später mit bestem Erfolg Anwendung in Räumen mit ätzenden Dünsten (Ställen, Waschküchen, Chemischen Fabriken usw.), nachdem deren Konstruktion im Laufe der Jahre unter Verwendung von Papierbandumwicklung mit gleicher Imprägnierung wesentlich verbessert worden war. Für die gleichen Zwecke werden auch noch von anderen Fabriken wetter- und säurebeständige Leitungen hergestellt, welche den normalen Gummiaderleitungen entsprechen, deren äußere Beklöppelung aber mit besonderen Imprägniermassen getränkt ist.

Isolierte Leitungsdrähte für Verwendung in Maschinen und Apparaten. Bei diesen Drähten wird die Isolierung, um den Wicklungsraum möglichst gut ausnützen zu können, nur so stark gewählt, als es die vorkommenden Spannungen erfordern, alle stärkeren Drähte erhalten daher nur ein- oder mehrfache Baumwollumspinnung (bei Hochspannung auch Umklöppelung). Die ganz dünnen Drähte sind mit Seide umsponnen. Da der Raumbedarf der Baumwoll- oder Seidenumspinnung bei dünnen Drähten im Verhältnis zum wirksamen Kupferquerschnitt beträchtlich ist, werden in den letzten Jahren diese Umspinnungen auch durch einen gut isolierenden elastischen Lacküberzug ersetzt wie bei den sogenannten Emailledrähten, gewöhnlichen Kupferdrähten, die nach einem Tauchverfahren mit einem Emailleüberzug versehen werden. Sie werden für Drahtdurchmesser von 0,07—2 mm hergestellt und bieten neben besonders günstiger Raumausnutzung große Widerstandsfähigkeit gegen Hitze.

(670) Leitungsverlegung. Der größte Feind einer guten Isolation und damit auch aller elektrischen Leitungen ist die Feuchtigkeit, deren Wirkung um so stärker wird, je mehr chemisch wirksame Substanzen saurer oder alkalischer Natur sie enthält, wie beispielsweise die Ausschwitzung frischen Mauerwerks und in noch höherem Maße die in Brauereien, chemischen Fabriken u. dgl. auftretenden feuchten und ätzenden Dünste. Diese greifen die Isolierhülle der Drähte an und ermöglichen dadurch Fehlerströme, die wiederum elektrolytisch zerstörend auf die Isolierung einwirken. Zweck einer sachgemäßen Verlegung ist demnach die dauernde Aufrechterhaltung guter Isolation und der Schutz der Leitungen vor schädlichen Einflüssen, besonders solchen chemischer Natur.

Obigen Anforderungen entsprechen nicht das früher sehr beliebte Anheften der Starkstromleitungen mit Metallkrampen sowie die Einbettung der Leitungsdrähte in Holzleisten; diese Verlegungsarten sind daher für nicht betriebsmäßig geerdete Leitungen verboten und unter allen Umständen zu vermeiden. Die Leitungsdrähte werden jetzt entweder an besonderen, meist aus Porzellan (bisweilen auch Glas) bestehenden Isolatoren, wie Rollen, Klemmen, Glocken usw., befestigt und frei in bestimmtem Abstande von der Wand gehalten, oder sie werden in Rohre aus Isoliermaterial oder in Metallrohre mit oder ohne isolierende Auskleidung eingezogen, schließlich auch in Form sogenannter Manteldrähte mit Krampen oder Schellen unmittelbar auf der Wand befestigt.

(671) Offene Verlegung. Die freie Verlegung an Rollen, Glocken oder dgl. bietet zwar bei sachgemäßer Ausführung eine sehr gute Isolation und einen hohen Grad von Betriebssicherheit, eignet sich aber ihres ungefälligen Aussehens halber wenig für bessere Innenräume und findet daher hauptsächlich Verwendung in Werkstätten, Betriebsräumen und Nebenräumen von Wohnungen.

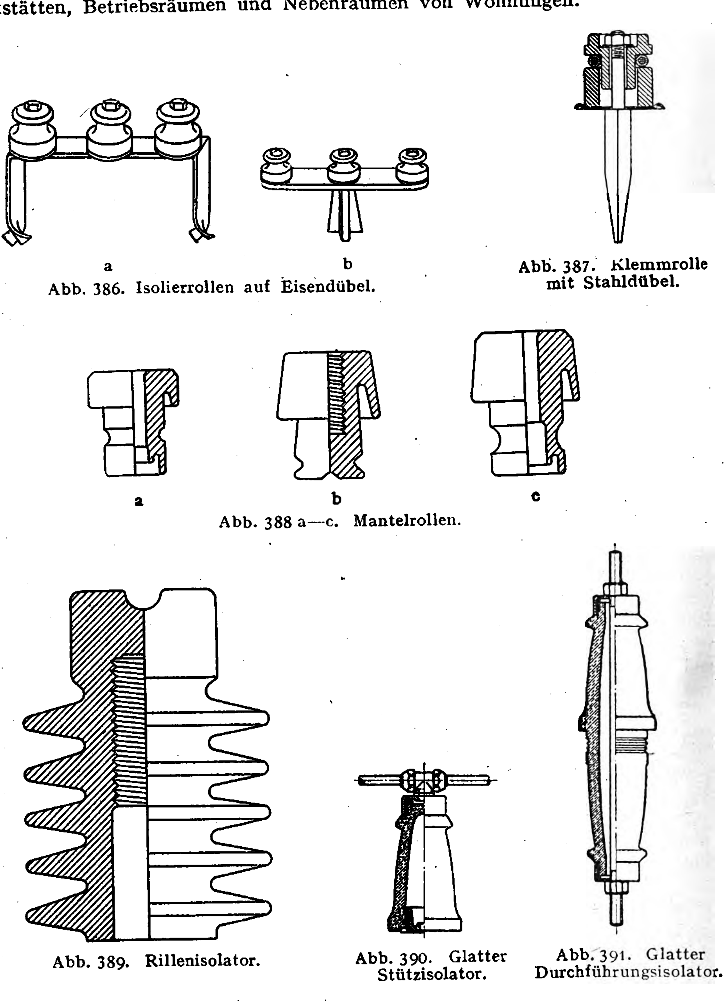


Abb. 386. Isolierrollen auf Eisendübel.

Abb. 387. Klemmrolle mit Stahldübel.

Abb. 388 a—c. Mantelrollen.

Abb. 389. Rillenisolator.

Abb. 390. Glatter Stützisolator.

Abb. 391. Glatter Durchführungsisolator.

Die Rollen selbst werden, da Holzdübel sich mit der Zeit lockern, jetzt meistens auf eisernen Trägern und Leisten festgeschraubt (Abb. 386 a und b). In gut ausgestatteten Räumen, Wohnzimmern usw. werden die kleineren und besser aussehenden Klemmrollen vorgezogen, an die die Leitung nicht festgebunden, sondern zwischen beiden Teilen des Isolators selbst festgeklemmt wird. Abb. 387 zeigt eine von Peschel (Hartmann & Braun) angegebene Klemmrolle auf einem gleichfalls von Peschel angegebenen vierkantigen Stahldübel.

Diese Rollen werden besonders bei fester Verlegung von verdrillten Gummiaderschnüren angewendet, indem sie zwischen den beiden Leitungsadern hindurchgesteckt werden.

In feuchten Räumen genügen gewöhnliche Rollen vielfach nicht, da herabtropfende Feuchtigkeit an jeder Befestigungsstelle Isolationsfehler herbeiführen kann. Hier finden die für solche Räume besonders ausgebildeten Mantelrollen Verwendung, an deren äußerem Mantel die Feuchtigkeit abtropfen kann, ohne über die Bindestelle zu fließen, und bei denen die Stromwege für Oberflächenleitung möglichst vergrößert sind (Abb. 388 a bis c).

Für Hochspannung sind die sog. Rillenisolatoren (Abb. 389) gebräuchlich, die sowohl zur Verlegung der Leitungen selbst, wie auch beim Apparatebau für Hochspannung in den mannigfachsten Formen angewendet werden. Auch glatte Isolatoren finden hierfür Verwendung (ETZ 1910, H. 3), sei es als einfache Stützisolatoren (Abb. 390), oder als Durchführungsisolatoren (Abb. 391) im Schalttafel- und Apparatebau.

(672) Rohrverlegung. Grundbedingungen für die Brauchbarkeit eines Rohrsystems sind die jederzeitige Zugänglichkeit und Auswechselbarkeit der Leitungsdrähte, Forderungen, die in vollem Umfange zum ersten Male in einem von Bergmann ausgearbeiteten Systeme erfüllt worden sind. Alle Rohre gehen hierbei von Abzweigungen oder Dosen aus, in denen die nötigen Verbindungen, Verlötungen usw. hergestellt werden; in größere Rohrwege sind außerdem noch Zwischendosen eingefügt, so daß bei Benutzung genügend weiter Rohre das ganze Rohrsystem für sich allein verlegt werden kann und erst nach Fertigstellung der Bauarbeiten und Austrocknen des Baues die Leitungen nachträglich mit Hilfe eines Stahlbandes eingezogen zu werden brauchen und jederzeit auswechselbar sind. Passende Muffen, Winkel- und Krümmerstücke erleichtern die Montage.

Dieses System läßt sich im Prinzip auf Rohre aus jedem Material anwenden; ursprünglich wurden hauptsächlich solche aus Hartgummi oder Metall benutzt. Hartgummirohre haben den Vorteil, daß sie selbst noch eine isolierende Einbettung für die Leitungsdrähte bieten, sie sind leicht zu hantieren und zu verlegen. Gegen mechanische Beschädigungen bieten sie dagegen keinen Schutz; wo solcher erforderlich, sind Metallrohre vorzuziehen; da diese indessen selbst leitend sind, müssen die Leitungsdrähte besonders gute Isolierung besitzen; es sind daher hierfür nur Gummiaderleitungen zulässig.

Bergmann hat zuerst Isolierrohre in den Handel gebracht, die aus Papier hergestellt und mit Isoliermasse getränkt sind. Jetzt werden solche Papierrohre auch von einer großen Anzahl Firmen, die sich fast alle in dem Verkaufsverband der Isolierrohrfabrikanten zusammengeschlossen haben, hergestellt.

Einfache Papierrohre haben sich bei Verlegung unter Putz nicht bewährt, da sie nach einiger Zeit Feuchtigkeit aufnehmen; sie dürfen daher in dieser Weise nicht verwendet werden und sind auch in feuchten Räumen unzulässig. Sie erhalten meistens eine Metallhülle als Schutz, die entweder aus umfalztem dünnen Messing- oder Stahlblech, neuerdings häufig aus verbleitem Stahlblech oder aus stärkerwandigen Stahlrohren besteht (Panzerrohr). Da der dünne Mantel der umfalzten Rohre von der Mauerfeuchtigkeit verhältnismäßig leicht angegriffen wird, versieht man ihn vor der Verlegung unter Putz mit einem Schutzanstrich von Mennige, Asphalt oder Emaillelack. Widerstandsfähiger, vor allem auch gegen mechanische Beschädigung, ist unter allen Umständen das Panzerrohr.

Da in größeren Rohrnetzen sich leicht Feuchtigkeit niederschlägt, ist mit Sorgfalt darauf zu achten, daß die Rohre mit Gefälle verlegt werden und solche Stellen, an denen Schwitzwasser sich ansammeln kann (Wassersäcke), nicht vorkommen. Das bereits erwähnte nachträgliche Einziehen der Leitungen in das vollkommen fertig verlegte Rohrsystem ist stets vorzuziehen, in Neubauten aber dringend notwendig. Werden in letzterem Falle die Drähte mit den Rohren zugleich verlegt, so verursacht das auftretende Schwitzwasser, auch wenn keine

Wassersäcke vorhanden sind, ein Stocken mit nachfolgender völliger Zerstörung der Isolation der Leitungen. Es empfiehlt sich dringend nach erfolgter Rohrverlegung und Fertigstellung des Wandverputzes von allen Abzweigdosen und

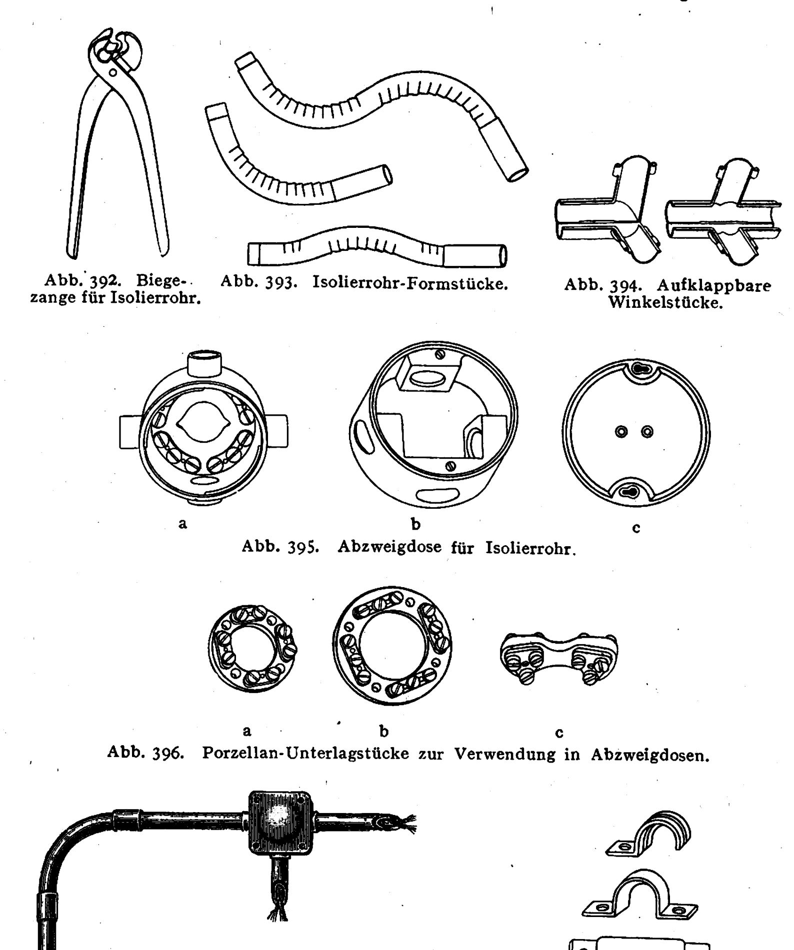


Abb. 392. Biegezange für Isolierrohr.

Abb. 393. Isolierrohr-Formstücke.

Abb. 394. Aufklappbare Winkelstücke.

Abb. 395. Abzweigdose für Isolierrohr.

Abb. 396. Porzellan-Unterlagstücke zur Verwendung in Abzweigdosen.

Abb. 397. Panzerrohr mit Abzweigdose.

Abb. 398. Rohrschellen und Rohrhaken.

Schaltdosen die Deckel zu entfernen und für vollkommene Öffnung aller Rohrenden Sorge zu tragen, damit bis zum Einziehen der Leitungen, welches nicht früher als unbedingt nötig erfolgen sollte, eine ausreichende Durchlüftung und Austrocknung des Rohrsystems im Innern eintritt.

Die Rohre werden in Baulängen von etwa 3 m hergestellt. Die Verbindung der einzelnen Rohre unter sich geschieht durch übergeschobene und verkittete Muffen aus Messing oder Eisenblech. Die Rohre mit umfalztem Metallmantel können mittels besonderer Biegezangen (Abb. 392) in beliebigen Kurven gebogen werden; für die am häufigsten vorkommenden Kurven und Winkel werden auch besondere Formstücke (Ellbogen, Kröpfungs- und Übergangsbogen) angefertigt (Abb. 393). An Winkel- und Abzweigstellen können auch aufklappbare Winkel- und T-Stücke Verwendung finden, die den Zugang zu den Leitungen ermöglichen (Abb. 394). Für die verschiedenen Arten von Leitungsverzweigungen werden Abzweig- und Schaltdosen benutzt, die aus Hartgummi, Papiermasse oder künstlichen Isoliermaterialien mit oder ohne Metallüberzug hergestellt werden (Abb. 395). Innerhalb dieser Dosen werden vielfach Unterlegstücke aus Porzellan montiert, welche die Abzweigklemmen

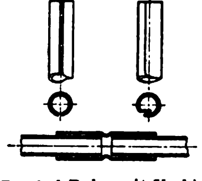


Abb. 399. Peschel-Rohr mit Verbindungsmuffe.

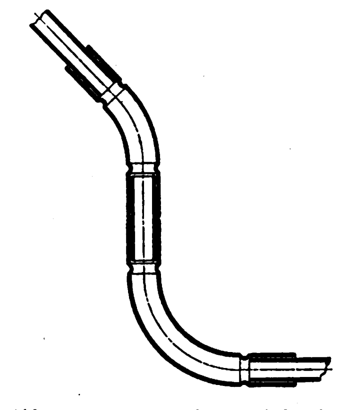


Abb. 400. Krümmer für Peschel-Rohr.

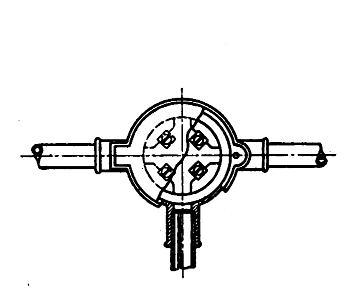




Abb. 401. Abzweigdose für Peschel-Rohr.

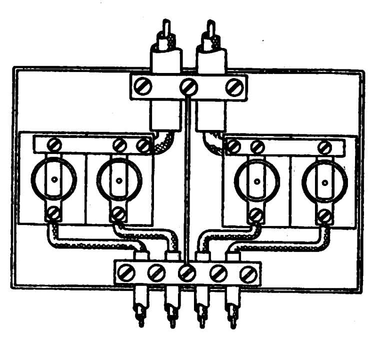


Abb. 402. Verteilungstafel für Peschel-Rohranschlüsse mit Rohr als Rückleitung.

tragen und voneinander isolieren (Abb. 396). Die Verlegung der Stahlpanzerrohre ist ähnlich wie bei Gasrohren, die Verbindung der Rohre erfolgt durch Verschraubung, die Verbindungs- und Abzweigdosen sind gleichartig, jedoch kräftiger gehalten als für das schwächere Material (Abb. 397). Die Befestigung der Rohre auf der Wand geschieht durch Rohrschellen, Rohrhaken oder Krammen (Abb. 398).

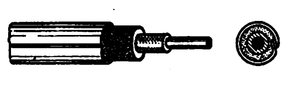
In der Absicht, etwa sich bildender Feuchtigkeit die Möglichkeit des Abflusses oder der Aufsaugung durch das Mauerwerk zu bieten, finden auch dünnwandige, längsgeschlitzte und dadurch federnde Metallrohre Verwendung. Auf diesem

Material hat Peschel ein Installationssystem aufgebaut (ETZ 1902), das besonders dadurch eine Vereinfachung erstrebt, daß nur die eine Stromleitung aus gut isoliertem Drahte besteht, während das Metallrohr selbst, eventuell unter Zuhilfenahme eines miteingezogenen blanken Drahtes, als geerdete Rückleitung dient. Für Verteilungssysteme ohne geerdeten Leiter bieten die Schlitzrohre ein gutes und bequem zu montierendes Schutzmittel gegen mechanische Beschädigung.

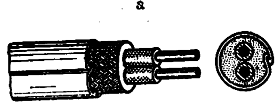
Bei dem Peschelschen Rohrsystem werden die geschlitzten Stahlrohre durch übergeschobene Muffen federnd verbunden. Die Abzweigdosen, Winkel- und T-Stücke für dieses System sind in den Abb. 399 bis 401 dargestellt. Abb. 402 zeigt eine Verteilungstafel mit Peschelrohranschluß und Rückleitung durch den Rohrmantel. Das Abschneiden von Rohren auf besondere Länge bei der Montage bedingt ein sorgfältiges Beseitigen des durch das Abschneiden entstehenden inneren Grates, der sonst beim Einziehen der Leitungen die Isolation verletzt.

Für alle Rohrverlegungen ist von größter Wichtigkeit, daß die Querschnitte der Rohre reichlich groß bemessen und alle scharfen Biegungen vermieden werden; die beste Kontrolle hierüber besteht in dem nachträglichen Einziehen der Leitungen nach Verlegung des gesamten Rohrnetzes.

(673) Manteldrähte (Rohr- und Falzdrähte). Diese zuerst von Kuhlo hergestellten und zu einem besonderen Verlegungssystem ausgebildeten Leitungen haben über dem Leiter (Kupfer, Aluminium, Zink, Eisen) eine Gummi- oder eine imprägnierte Papierhülle, die noch von einer weiteren Isolierschutzhülle (bei Mehrleitern gemeinsam, s. Abb. 403b) umgeben ist. Der den Draht fest einschließende Mantel mit Falz (ursprünglich nahtlose Rohrhüllen) wird aus den verschiedensten Metallen (außer Blei) hergestellt. Solche Drähte dürfen mit Schellen direkt auf Wänden in trockenen Räumen verlegt werden; sie erfordern eine gewisse Geschicklichkeit bei der Montage, können aber dafür ziemlich unauffällig verlegt werden. Sie finden mit Vorliebe Verwendung in Anlagen mit geerdetem Mittelleiter, wobei ihre Metallhülle als Rückleitung dient. Die Garniturteile sind in ihren Abmessungen kleiner, jedoch ähnlich gehalten wie diejenigen für Rohrinstallation (Abb. 404).

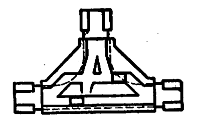


a



b

Abb. 403. Falzdrähte.



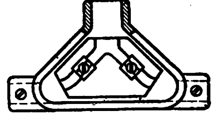


Abb. 404. Abzweigklemmen für Falzdrähte.

Apparate in elektrischen Anlagen.

(674) Normalien des VDE. Die wesentlichsten, in elektrischen Anlagen verwendeten Apparate, wie Aus- und Umschalter, Steckvorrichtungen, Sicherungen und Fassungen, waren in den letzten Jahren Gegenstand besonders sorgfältiger Bearbeitung seitens der in dem VDE vereinigten Firmen. Der Niederschlag aller auf diesem Gebiete gesammelten Erfahrungen ist in den mit Gültigkeit vom 1. 7. 1915 erlassenen Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial und in einer Reihe besonderer Normalien für einzelne Gattungen von Apparaten zusammengefaßt.

Die von dem VDE festgelegten Grundsätze sichern nicht allein die konstruktive Zuverlässigkeit des einzelnen Apparates, sie arbeiten auch auf eine allmähliche Vereinheitlichung aller zurzeit in Form und Durchbildung noch ver-

schiedenen Systeme hin, um mit technischer Vervollkommnung auch die Gleichartigkeit der Formen aller wichtigen Apparate als letztes Ziel zu erstreben. In dieser Richtung ist durch Klement und Paulus dadurch ein bedeutender Schritt nach vorwärts getan, daß diese sich der außerordentlichen Arbeit unterzogen, alle bestehenden Konstruktionen der verschiedenen Apparate durch Wort und Bild in ihrem Buch „Zur Vereinheitlichung der elektrotechnischen Starkstrominstallation" 1. Kapitel: Haus- und Wohnungsanschlüsse (Springer, Berlin) den Erzeugern und Abnehmern vor Augen zu führen unter gleichzeitiger Anregung aus dieser Vielseitigkeit der Formen und Konstruktionen die konstruktiv besten und wirtschaftlich geeignetsten zur Schaffung von Normen auszuwählen.

In den Verbandsnormalien sind für Dosenschalter (Aus- und Umschalter) Steckvorrichtungen, Fassungen mit Hahn, Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz, die Konstruktion, Nennstromstärken, die Nennspannungen und die Prüfspannungen, Prüfstrom festgesetzt. Wichtig hierbei ist, daß die unterste Grenze der Gebrauchsspannung für diese Apparate 250 V beträgt und diese für Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz sogar auf 500 V hinaufgesetzt wurde. Für Steckvorrichtungen sind wegen der Bauart wie auch bezüglich der Abmessungen genaue Bestimmungen getroffen. In ähnlicher Weise sind Hebelschalter, Ölschalter und offene Schmelzsicherungen soweit als möglich normalisiert. Die Betriebssicherheit der Anlagen ist hierdurch bedeutend gehoben.

(675) Aus- und Umschalter. Diese Apparate dienen zur Ein- und Ausschaltung von Stromkreisen und Verbrauchsapparaten bzw. zu deren Umschaltung, d. h. zur Änderung ihrer Verteilung und Gruppierung. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen:

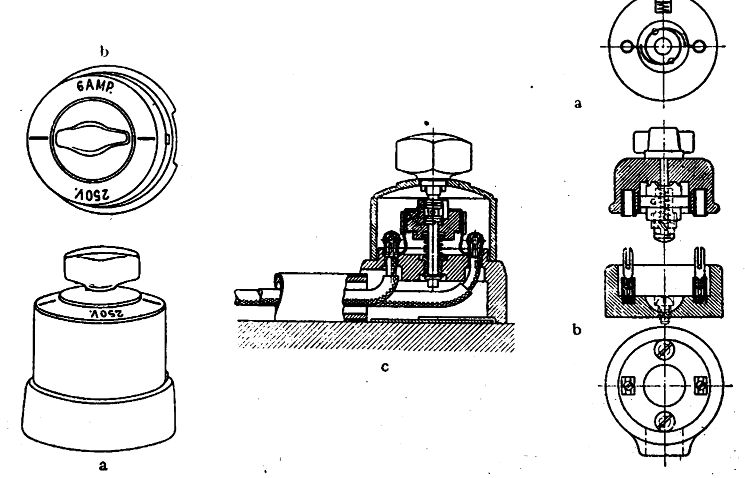


Abb. 405 a, b. Normaler Drehschalter (AEG).

Abb. 405 c. Normaler Drehschalter für Rohranschlüsse.

Abb. 406 a, b. Zeta-Drehschalter (SSW).

1. die Installationsschalter, meist als Dosenschalter gebaut, sind überwiegend für geringere Energiemengen bemessen, die hauptsächlich in Licht- und Kraftanlagen privater Stromabnehmer Verwendung finden.

2. Betriebsschalter für größere Verbrauchsapparate in technischen Betrieben sowie zur Umschaltung stark belasteter Stromerzeuger und Leitungsgruppen.

Die Installationsschalter, vorwiegend als Drehschalter ausgebildet, sind Massenartikel; sie werden meist von wenig sachverständigem Personal gehandhabt und müssen daher einfach und dauerhaft sein. Auf den Schutz der unter Spannung stehenden Teile vor zufälliger Berührung ist besondere Sorgfalt zu verwenden. Abb. 405 a bis c zeigt den normalen Drehschalter der AEG. Abb. 406 a und b einen sogenannten Zeta-Schalter der SSW. Letzterer besteht aus zwei Teilen, der untere a wird mit den Leitungen zugleich fest verlegt, der obere b nachträglich aufgesetzt und ist nach Eindrücken einer Feder wieder abnehmbar.

Die Betriebsschalter müssen in erster Linie ihrem besonderen Zwecke entsprechend sorgfältig durchgebildet sein, zumal wenn sie für große Energiemengen bestimmt sind. Betriebsschalter haben normalerweise den Bedürfnissen des regulären Betriebes zu entsprechen, bieten aber häufig auch die letzte Möglichkeit,

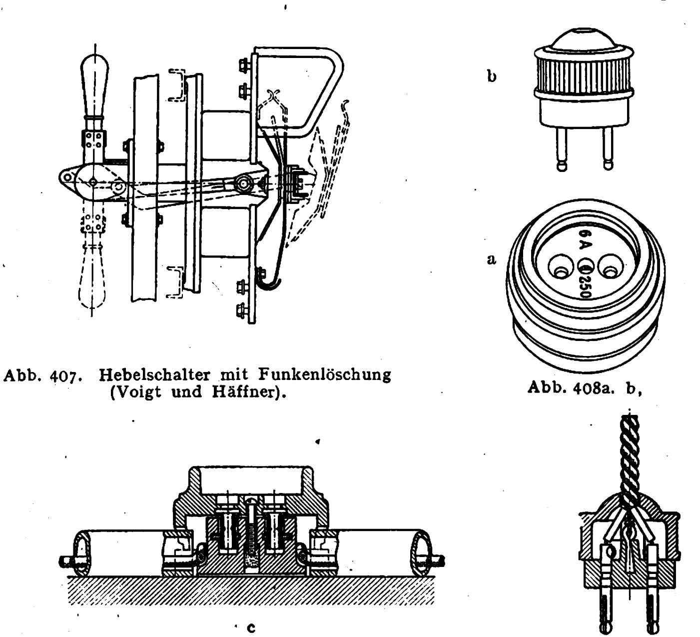


Abb. 407. Hebelschalter mit Funkenlöschung (Voigt und Häffner).

Abb. 408a. b,

Abb. 408 a—d. Normale Steckvorrichtung mit Rohranschluß AEG).

schwere Betriebsstörungen abzuwenden (Kurzschluß, Überlastung usw.). Besonders der letzte Gesichtspunkt ist von Einfluß auf ihre Konstruktion und auf ihre örtliche Anordnung. Diesen verschiedenen wichtigen Anforderungen, namentlich für größere Stromstärken und für 500—750 V Nennspannung entsprechen am besten die Ölschalter (682), die auch als Selbstausschalter und Fernschalter gebaut werden.

Die Kontaktflächen sollen groß und eben sein, im Kontakte müssen die Flächen mit großer Kraft festgehalten werden.

Man kann im allgemeinen auf je 5 A Normalstromstärke 1 cm² einseitige Kontaktfläche rechnen, bei spezieller konstruktiver Durchbildung, beispielsweise bei gut unterteilten federnden Kontakten, erheblich mehr, u. U. bis 30 A.

Um den zerstörenden Einfluß der Funkenbildung bei der Ausschaltung unschädlich zu machen, werden bisweilen zwei Unterbrechungsstellen nebeneinander

verwendet; die eine, aus Metallflächen gebildet, dient zur Herstellung des eigentlichen innigen Kontaktes; diese wird bei der Ausschaltung zuerst unterbrochen. Ihr parallel geschaltet besteht ein zweiter Kontakt aus zwei gegeneinander gepreßten Kohlenstäben oder Blöcken, bei deren Unterbrechung erst sich der Ausschaltungsfunke bildet; noch besser wird die schädliche Einwirkung der Funkenbildung an den Unterbrechungskontakten bei den Ölschaltern vermieden, da hier die Ausschaltung unter Luftabschluß erfolgt und die auftretenden Funken durch das Öl ganz erheblich verringert werden.

Betriebsschalter für Niederspannung sind meist als Hebelschalter ausgebildet; außer in elektrischen Betriebsräumen sollen sie Momentschalter sein (Abb. 407).

(676) Steckvorrichtungen. Diese wichtigen Apparate, welche zum Anschluß transportabler Lampen, Motoren u. dgl. Verwendung finden, sind besonders sorgfältiger Durchbildung unterzogen worden. Die neuesten Konstruktionsnormalien, vom 1. Juli 1915 ab in Kraft, umfassen zwei- und dreipolige Steckvorrichtungen für Spannungen bis 750 V und für die Stromstärken von 6 A und 25 A.

Für die Normalisierung wesentlich ist die Unverwechselbarkeit bezüglich der Stromstärke; sie wird erreicht durch unterschiedlichen Mittelabstand der Stifte und Buchsen.

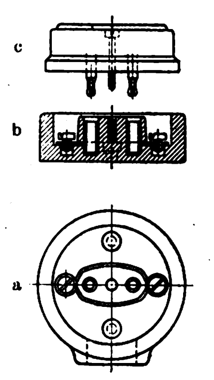
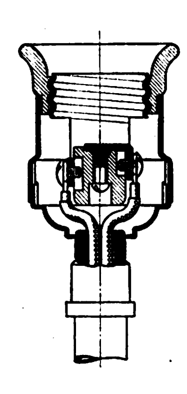



Abb. 409 a—c. Zeta-Steckvorrichtung (SSW).


Abb. 410. Normalfassung.

Um bei Hantierung an der Steckvorrichtung die Berührung unter Spannung stehender Teile unmöglich zu machen, ist die Steckdose am Rande mit einem Wulst versehen und die Kontakthülsen sind isoliert abgedeckt (Abb. 408 a bis d und 409 a bis c).

(677) Fassungen. Alle Fassungskonstruktionen müssen den von dem VDE aufgestellten Forderungen entsprechen. Von den verschiedensten Systemen von Lampenfassungen hat dasjenige die größte Verwendung gefunden, welches mit dem Edisongewinde versehen ist (Abb. 410). Bei dem Bau der Fassungen ist anzustreben, daß jeder Grat vermieden wird, da er die Isolierung der Drähte zerschneidet und zu Körperschluß Anlaß gibt. Ferner ist darauf zu achten, daß die Anschlußdrähte derart befestigt werden, daß sie auch bei nicht ganz sorgfältiger Montage den Fassungsmantel nicht berühren können. Dies gilt besonders für das Einziehen von Schnüren. Wegen der Schwierigkeit, sämtliche Litzenenden unter die Klemmenschrauben zu bringen, empfiehlt sich die Verlötung der einzuklemmenden Litzenenden. Man strebt deshalb danach, den inneren Teil der Fassung mit isolierender Auskleidung zu versehen. Da die Berührung von Fassungen, welche mit Körperschluß behaftet sind, unter Umständen gefährliche Folgen haben kann, sind für

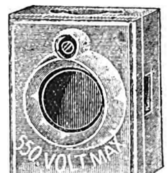
Handlampen, wie überhaupt in feuchten und durchtränkten Räumen, Fassungen zu verwenden, deren äußere Teile aus Isoliermaterial (Porzellan, Steingut u. dgl.) bestehen.

Um die Berührung unter Spannung stehender Teile an der Glühlampe selbst zu verhindern, erhalten die Fassungen einen Fassungsring aus Isoliermaterial, welcher die Metallteile des Lampensockels umfaßt. Da, besonders bei den neueren Metallfadenlampen, diese Metallteile eine ziemliche Ausdehnung besitzen, ist auf Verwendung richtig bemessener Fassungsringe besonderer Wert zu legen.

Zum Teil werden die Fassungen mit einem kleinen Ausschalter versehen (Hahnfassungen); die Unterbringung dieser Vorrichtung in dem an sich beschränkten Raume der Fassungen bietet jedoch gewisse Schwierigkeiten, und man wird aus diesem Grunde mit der Zeit Hahnfassungen zu vermeiden suchen.

Schmelzsicherungen für Installationen.

(678) Schraubstöpsel. Das erste vollständig durchgebildete System, Sicherungsstöpsel mit Schraubgewinde, rührt von Edison her. Die im folgenden dargestellten Formen entsprechen den Konstruktionen der AEG, die dieses System übernommen und nicht verlassen hat. Dasselbe ist daher auch für alle vier vorhandenen Größen normalisiert. Man unterscheidet Mignon-, Normal-Edison-, Großes Edison- und Goliath-Edisongewinde. Die beiden letzteren Gewinde wurden für die in den letzten Jahren hergestellten größeren Metalldrahtlampen erforderlich.



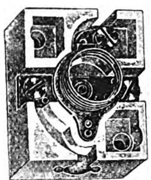


Abb. 411 u. 412. Normalelement für Edison-Sicherungen (AEG).

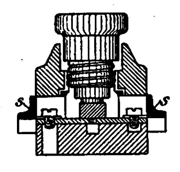
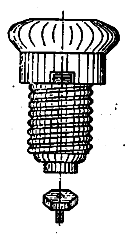


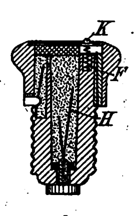
Abb. 413. Normalelement für Edison-Sicherungen im Schnitt.



a



b



c

Abb. 414 a bis c. Edison-Sicherungsstöpsel, normales Modell.

Bei den Schraubstöpseln wird die Unverwechselbarkeit durch die verschiedene Länge der Stöpsel gewährleistet, sowie durch Kontaktschrauben gleichfalls verschiedener Höhe, die in die Sammelschienen der einzelnen Sicherungselemente eingeschraubt werden. Die Länge der Stöpsel von ihrer Auflagefläche bis zum Widerlager am Stöpselkopfe ebenso wie die Höhe der Kontaktschrauben sind derart bemessen, daß Stöpsel für eine höhere Betriebsstromstärke, als der eingesetzten Kontaktschraube entspricht, mit letzterer keinen Kontakt machen.

Abb. 411 zeigt ein Sicherungselement für Edisonstöpsel, Abb. 412 dasselbe mit abgehobenem Deckel, Abb. 413 ein solches im Schnitt mit eingesetztem Stöpsel. In dem letzten Falle ist auf die Sammelschienen beiderseitig ein isolierendes Schutz

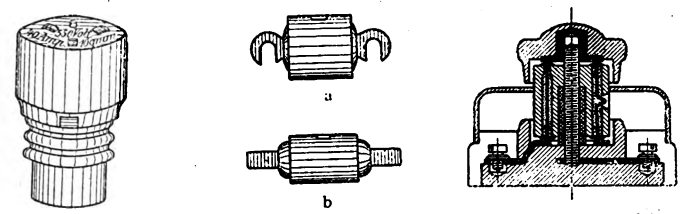


Abb. 415. Edison-Sicherungsstöpsel, großes Modell. Abb. 416. a) Schmelzpatronen zum Einschrauben, b) für Federkontakt. Abb. 417. Patronensicherung System Pa. (SSW).

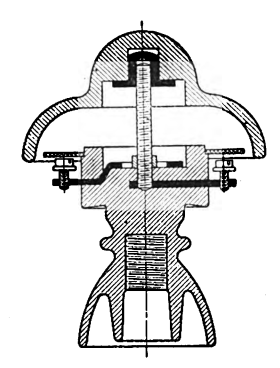


Abb. 418. Freileitungssicherung (SSW) ohne Patrone.

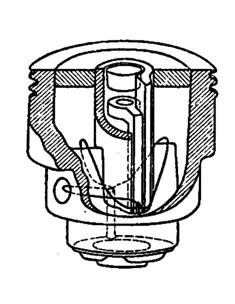
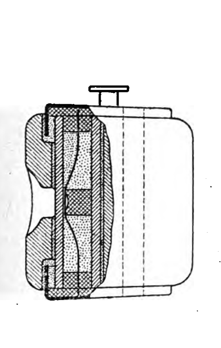


Abb. 419. Schmelzpatronen System HP. (SSW).



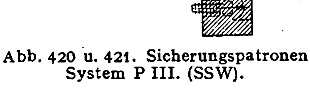


Abb. 420 u. 421. Sicherungspatronen System P III. (SSW).

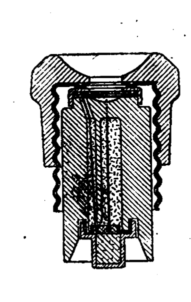


Abb. 422. Normale zweiteilige Sicherung System DL. (AEG).

plättchen *s* aufgeschraubt, welches verhindern soll, daß die unter Spannung stehende Sammelschiene seitlich berührt werden kann. Abb. 414 a zeigt einen Edisonstöpsel bis 500 V der AEG nebst einer Kontaktschraube, Abb. 414 b einen solchen Stöpsel

im Schnitt, und zwar unversehrt, Abb. 414 c denselben in abgeschmolzenem Zustande. In letzterem Falle hat der gleichfalls abgeschmolzene Hilfsdraht *H* die Kennmarke *K* freigegeben, und letztere tritt, getrieben durch die Feder *F*, aus dem Deckel des Stöpsels hervor, so daß durch Betasten auch im Dunkeln sich erkennen läßt, ob die Sicherung unversehrt ist oder abgeschmolzen. Die Sicherungen bis 250 V unterscheiden sich von den vorgenannten äußerlich dadurch, daß die Kennvorrichtung lediglich aus einem Draht hinter einem Glimmerfenster besteht, das Erkennen des Durchschmelzens daher nicht so leicht ist. Abb. 415 zeigt den großen Edisonstöpsel, welcher bis 60 A hergestellt wird.

Außer den Edisonsicherungen fertigt die AEG noch zwei Arten von Schmelzpatronen an, die aus einem Porzellankörper bestehen, in den luftdicht mit entsprechender Füllung silberne Schmelzdrähte eingebettet sind. Der Porzellankörper trägt wieder ein Fenster mit Kenndraht, die Patronen erhalten entweder Kabelschuhe zum Einschrauben in Sicherungsböcke (Abb. 416 a und b) oder einfache Kupferlamellen zum Einschieben in federnde Kontakte.

(679) Patronensicherungen. Die Siemens-Schuckert-Werke verfertigen Sicherungen in Patronenform. Abb. 417 zeigt eine Patrone Type SP mit dem zugehörigen Patronenfuß im Schnitt. Die Unverwechselbarkeit der Patrone wird durch verschieden große Aussparungen in ihrer Mitte erreicht, denen entsprechende Ansätze auf dem Patronenbolzen gegenüberstehen. Letztere werden durch 5 mm hohe Stellmuttern gebildet; jeder Normalstromstärke entspricht eine bestimmte auf der zugehörigen Patrone angegebene Zahl solcher Muttern. Die Patronen enthalten silberne Schmelzdrähte, die in ihrer ganzen Länge im Innern der nach außen völlig abgeschlossenen Porzellanpatronen liegen. Parallel zum Schmelzdraht ist ein außen sichtbarer Kenndraht angeordnet, der erkennen läßt, ob die Sicherung noch unverletzt oder durchgeschmolzen ist.

Abb. 418 stellt eine Freileitungssicherung auf Isolator dar, bei der der Patronendeckel schutzglockenartig ausgebildet ist.

Die Patronen HP (Abb. 419) erhalten außer den normalen noch eine größere unterste Stellmutter, die das Einsetzen der für niedrigere Spannungen bemessenen Patronen unmöglich macht.

Die Patronen P III werden nicht durch Schraubvorrichtungen befestigt, sondern mit ihren Stirnflächen zwischen zwei schwach geneigte Flächen der Anschlußkontakte gepreßt. Die Unverwechselbarkeit wird dadurch erzielt, daß der eine Kontakt der Patrone für verschiedene Stromstärken verschiedene Formen besitzt, während der Sicherungskörper ein mit entsprechender Durchgangsöffnung versehenes Einsatzstück aus Metall erhält.

Abb. 420 zeigt eine Patrone für sich, Abb. 421 eine solche eingesetzt in das zugehörige Sicherungselement mit seinen Kontaktstücken.

(680) Normalsicherungen. Außer den beschriebenen beiden Sicherungssystemen sind von verschiedenen Firmen noch eine ganze Anzahl anderer hergestellt worden, die indessen keine erhebliche Verbreitung gefunden haben. Immerhin ist eine solche Vielfältigkeit unerwünscht, und es richteten sich daher die Bestrebungen der „Vereinigung der Elektrizitätswerke" auf Vereinheitlichung der Sicherungen als des wichtigsten Installationsmaterials.

Eine Neukonstruktion der SSW, die in einer zweiteiligen Sicherung die Vorteile des Edisonschen Schraubstöpsels und der Walzenpatrone zu vereinigen sucht, gab Anlaß zu sorgfältigen Versuchen, auf Grund deren ein System zustande kam, das von den Firmen AEG, SSW und Voigt & Haeffner hergestellt wird und von der Vereinigung der Elektrizitätswerke und vom VDE als Normalsicherung anerkannt worden ist.

Die wichtigsten Grundzüge dieses Systems von Einheitssicherungen sind folgende:

1. Die Sicherung besteht aus einem Stöpselkopf mit Edisonschraubgewinde und einer auswechselbaren Walzenpatrone.



2. Die Schmelzpatronen werden durchweg für die Spannung 500 V hergestellt.

3. Die Unverwechselbarkeit wird erreicht durch verschiedene Durchmesser des Fußkontaktes der Patrone.

4. Alle Patronen sind mit Kennvorrichtung versehen, die das Abschmelzen einer Sicherung äußerlich sichtbar machen.

Abb. 422 zeigt eine solche von der AEG hergestellte Einheitssicherung mit Edisonnormalgewinde. Die Unverwechselbarkeit ist außer durch den Durchmesser des Fußkontaktes noch durch verschiedene Höhe der Patronen gewahrt. Die neuen Patronen sind daher ohne weiteres auch in dem alten Sicherungselement und mit den bisherigen Kontaktschrauben verwendbar.

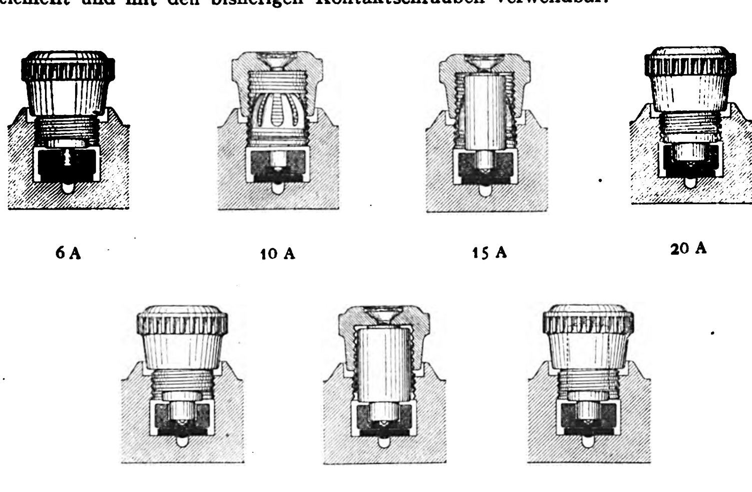


Abb. 423. Normale zweiteilige Diazedsicherungen (SSW).

In Abb. 423 ist eine Reihe Einheitssicherungen der SSW dargestellt von 6—60 A. Die Höhe der Patronen ist für alle Stromstärken gleich, im Hinblick auf die höheren Stromstärken von 35 und 60 A ist das große Edisongewinde verwendet.

Der weitere Ausbau dieser Einheitssicherungen ist zwischen den in Betracht kommenden Firmen vereinbart. Die Sicherungen für höhere Stromstärken erhalten gruppenweise wachsenden Durchmesser, zurzeit werden solche für Stromstärken bis 200 A bereits hergestellt.

Apparate für Hochspannung.

(681) Allgemeine Gesichtspunkte. Die Hochspannungsapparate dienen zu Schalt-, Meß- oder Schutzzwecken. Bei ihrer Durchbildung sind folgende Forderungen zu berücksichtigen: 1. zweckmäßigste Formgebung; 2. genügende Sicherheit gegen Durch- und Überschlag; 3. Vermeidung einer zu hohen Erwärmung; 4. leichte Auswechselbarkeit der Kontaktteile; 5. vorzügliche, dauernde Isolierung; 6. Ungefährlichkeit der Bedienung; 7. leichte Kontrolle der beweglichen inneren Teile der gekapselten Apparate; 8. Unterdrückung entstehender Lichtbogen. Die Bedienung muß leicht und gefahrlos erfolgen können, auch darf durch Explosion eines Apparates weder das Personal noch daneben befindliche Apparate in Mitleidenschaft gezogen werden. Nach den Vorschriften des VDE erfolgt die Her-

stellung der Apparate den Betriebsspannungen entsprechend in Serien. Bei wichtigen Schaltanlagen wähle man diese nicht zu knapp.

(682) Schalter. Die Unterbrechung *strom*führender Leitungswege erfolgt durch gekapselte Schalter, diejenige nur *spannungs*führender Leitungswege durch Trennschalter. Bei Unterbrechung von Stromkreisen mit hohem Energieverbrauch tritt starke Lichtbogenbildung auf. Zu deren Unterdrückung benutzt man bei Anlassern und Schaltern bis zu 1 kV die elektromagnetische Blaswirkung, zuweilen auch Kondensatoren. Bei Schaltern für höhere Spannungen legt man die Unterbrechungsstellen unter Öl. Bis 40 kV werden alle Phasen in einem Ölkessel (Abb. 424) vereinigt, bei höheren Spannungen erhält jede Phase einen besonderen Ölkessel (Abb. 425). Die Schaltbewegung erfolgt dann zwangläufig für alle Phasen gleichzeitig. Das verwendete Schalteröl muß besonderen Anforderungen hinsichtlich Reinheit und Kältebeständigkeit entsprechen. Ölschalter für Transformatoren oder lange Freileitungen werden zur Unterdrückung von Über-

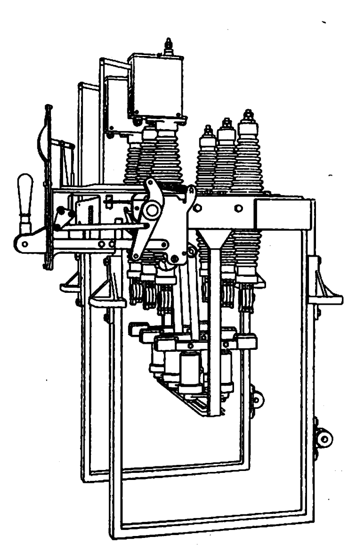


Abb. 424. Hochspannungs-Ölschalter bis 40 KV.

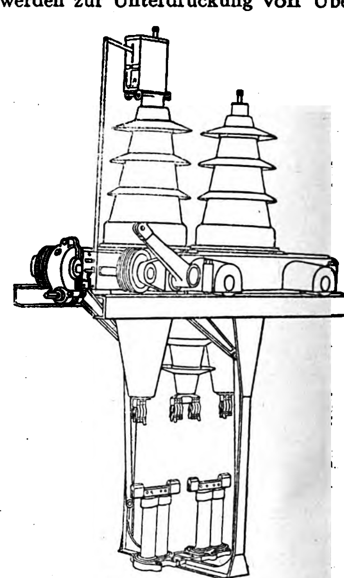


Abb. 425. Hochspannungs-Ölschalter über 40 KV.

spannungen mit Vorkontakten versehen, die einen Widerstand vorschalten. Der Widerstand wird entweder im Schalter oder außerhalb desselben in getrennten Ölkästen eingebaut. Die Schaltbewegung kann durch Hand, Fernbetätigung oder automatisch eingeleitet werden; der jeweilige Zustand des Schalters ist durch Markierscheibe, Signallampe oder -glocke erkenntlich. Besonders wichtig ist die automatische Auslösung bei Auftreten von Kurz- oder Erdschlüssen. Diese erfolgt direkt durch den Betriebsstrom, oder indirekt durch eine Kontaktvorrichtung, die ein Niederspannungsrelais einschaltet. Die direkten Stromauslöser werden am besten in allen Phasen außen auf die Durchführungsisolatoren aufgebaut, die Niederspannungsrelais der indirekten auf der Schalttafel oder an der Schaltzelle montiert. Um das Auslösen bei Störungen nicht beteiligter Schalter zu vermeiden, erhalten die einzelnen Schalter einstellbare Zeitrelais, deren Zeiten umgekehrt proportional der Reihenfolge der Schalter von den Stromerzeugern aus eingestellt werden. Man unterscheidet abhängige, unabhängige und bedingt abhängige

Stromauslöser je nach der Beziehung zu der Zeiteinstellung. Neuerdings werden die Stromauslöser für Generatoren mit einer Verriegelung versehen, die eine Auslösung der Maschinenschalter nur bei Störungen innerhalb der Schaltanlage oder an den Generatoren, bei Störungen im Netz nur die der betreffenden Streckenschalter zuläßt. Für Synchron- oder überhaupt Großmotoren finden außerdem Spannungsauslöser Verwendung, die beim Ausbleiben der Spannung den Motor abschalten. Für bestimmte Fälle sind auch automatische Umschalter gebräuchlich.

Die Trennschalter finden hauptsächlich aus Sicherheitsgründen Verwendung, um Teile der Schaltanlage einwandfrei spannungsfrei zu machen (Abb. 426). Sie bestehen entweder aus einpoligen Schaltmessern, die mit der Schaltstange einzeln bedient, oder aus dreipoligen Messern, die durch Hebel bewegt werden. Letztere Anordnung verdient den Vorzug. Trenn- und Umschalttrennmesser werden auch benutzt, um Teile der Anlage auf verschiedene Sammelschienensysteme legen zu können.

Die Mastschalter werden in Freileitungsstrecken eingebaut; sie sind besonders ausgebildete Trennmesser, die allpolig betätigt und mit Hörnern zur Ableitung des entstehenden Lichtbogens versehen sind. Hauptgewicht ist wegen der elektrischen und atmosphärischen Beanspruchungen auf sorgfältige Ausführung der Kontaktteile zu legen.

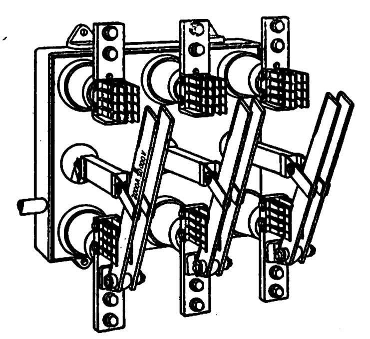


Abb. 426. Hochspannungsschalter (Trennschalter).

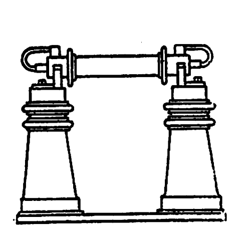


Abb. 427. Schmelzsicherung für Hochspannung.

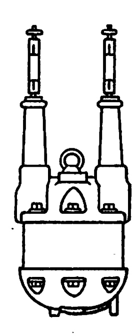


Abb. 428. Meßwandler.

(683) Sicherungen. Diese werden in der Hauptsache nur noch da verwendet, wo bei dem Schmelzen der Sicherungen kleine Leistungen abgeschaltet werden, um plötzliche Stromschwankungen, die schädliche Überspannungen auslösen, zu vermeiden. Sie werden also hauptsächlich für Meßwandler und kleinere Transformatoren eingebaut. Für größere Leistungen zieht man automatische Ölschalter vor. Die Sicherungen bestehen aus Isolatoren mit aufgebauten Kontaktbacken und der den Schmelzeinsatz enthaltenden Patrone (Abb. 427). Der Einsatz besteht aus feinem Silberdraht, der in die hohlen Patronen eingezogen oder nach einer Anordnung der AEG in Patronen zickzackförmig fest eingeschlossen wird. Die Patronen dürfen nur mit der Isolierzange eingesetzt werden. Beim Einbau der Sicherungen in ländliche Transformatorenstationen ist mit Rücksicht auf Witterungseinflüsse und Überspannungen auf genügend hohe Stützisolatoren zu sehen.

Die früher gebräuchlichen Durchschlagssicherungen an Transformatoren werden wegen der durch sie verursachten häufigen Störungen und Unkosten kaum mehr benutzt.

(684) Meßwandler. Da die Meßinstrumente in den meisten Fällen auf der von der Anlage räumlich getrennten Schaltwand eingebaut werden und Hochspannung nicht führen sollen, sind Apparate notwendig, die eine elektrische Trennung von

der Hochspannung ermöglichen. Die Spannungswandler sind kleine, in Öl oder Kompoundmasse eingebettete Transformatoren, welche die Hochspannung auf meistens 110 V herabsetzen (Abb. 428). Sie werden gewöhnlich einphasig ausgeführt. Für Drehstromanlagen genügen 2 Spannungswandler in der von den SSW angegebenen V-Schaltung. Hoch- und niederspannungsseitig werden Sicherungen vorgeschaltet. Die Stromwandler haben den doppelten Zweck, die Stromstärke auf eine für Meßapparate gebräuchliche Höhe herabzusetzen und den Meßstromkreis von der Hochspannung zu trennen. Sie werden nur einphasig ausgeführt und erhalten Luft- oder Kompound- oder Ölisolation. Beim Ausbau der an die Stromwandler angeschlossenen Instrumente ist die Niederspannungsseite der Stromwandler kurz zu schließen, da in der offenen Leitung infolge der vorhandenen, wenn auch wenigen Windungen in diesen gefährliche Spannungen induziert werden können.

(685) Überspannungsschutzapparate. (115, c) Die Frage des Überspannungsschutzes ist in den letzten Jahren sehr gefördert worden, ohne jedoch eine endgültige Lösung gefunden zu haben. Man unterscheidet Überspannungen infolge statischer Ladungen, innerer Vorgänge in der Anlage und atmosphärischer Einwirkungen. Zur Ableitung statischer Ladungen verwendet man W a s s e r s t r a h l e r d e r,

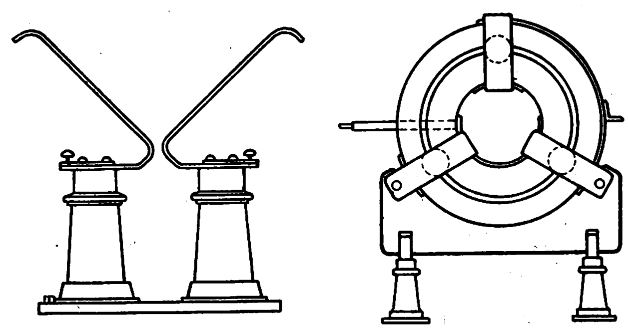


Abb. 429. Hörnerableiter. Abb. 430. Drosselspule.

bei denen ein Wasserstrahl von bestimmtem Querschnitt die Verbindung mit Erde herstellt (962). Sie besitzen einen ziemlich hohen, von der Beschaffenheit des Wassers abhängigen Eigenverbrauch und bedürfen sorgfältiger Einstellung und Wartung. Die Wasserzuführung erfolgt durch natürlichen Druck oder durch besondere Pumpen. Zweckmäßiger sind die neuerdings bevorzugten E r d u n g s d r o s s e l - s p u l e n. Diese bestehen aus einer Widerstandsspule von hoher Induktivität und geringem Ohmschen Widerstand. Oft ist noch eine sekundäre Wicklung für die Messung der Spannung angebracht. Der Eigenverbrauch dieser Drosselspulen ist gering, eine besondere Wartung nicht nötig. Für niedere Spannungen kommen auch H ö r n e r a b l e i t e r zur Anwendung. Die Hörner erhalten an dem auf dem Isolator befestigten Schenkel größere Metallflächen, außerdem ist das eine Horn beweglich. Der Apparat wirkt wie ein Elektroskop; das bewegliche Horn wird bei genügender Aufladung von dem andern Horn angezogen, verringert die Überschlagslänge und leitet den die Ladung nach Erde abführenden Lichtbogen ein.

Zur Ableitung bzw. Vernichtung der anders gearteten Überspannungen dienen hauptsächlich die folgenden Einrichtungen: 1. H ö r n e r a b l e i t e r mit vorgeschalteten Emaille- oder Ölwiderständen, die zur Begrenzung der Stromstärke dienen (Abb. 429). Für Freileitungen werden die Hörner in Stern, für Sammelschienen in Sterndreieck geschaltet. Die in Öl eingebauten Widerstände erhalten Temperatursicherungen, die bei einer Erhitzung auf 80° C. abschmelzen und den

Widerstand vor Überlastung schützen. Die Hörner sind in genügender Entfernung von Gebäude- und Konstruktionsteilen aufzustellen. 2. Kondensatoren aus Glas oder Papier, die die Wanderwellen ins Netz zurückwerfen, sie für die dahinter liegenden Anlageteile also abflachen. Die Durchbildung der Kondensatoren ist noch nicht abgeschlossen. 3. Drosselspulen ohne und mit Eisen in Spiralen- oder Tellerform ohne oder mit parallel geschalteten Ohmschen Widerständen sowie Kondensatordrosselspulen (Abb. 430). 4. Überbrückungswiderstände von hohem Ohmschen Widerstand und Funkenstrecken für Stromwandler wie Stromauslöser. 5. Induktionsfreie Vorschaltwiderstände, die vor die Meßwandler geschaltet werden. Die unter 3 bis 5 genannten Apparate dienen ebenfalls zur Abflachung der Wellenstirn von Überspannungen.

(686) Meßinstrumente. Direkt in die Hochspannung werden nur Strommesser und statische Voltmeter eingebaut. Die Amperemeter dienen vornehmlich zur schnelleren Feststellung von Erdschlüssen in den Fernleitungen. Die statischen Voltmeter werden für die Prüfung der Isolation der Hochspannungsanlage benutzt. Die übrigen Instrumente in einer Hochspannungsanlage wie Volt-, Ampere-, Wattmeter, Phasen- und Frequenzmesser, sowie Synchroskop werden über Meßwandler angeschlossen.

(687) Sonstige Apparate. Als Erdschlußprüfer werden statische Voltmeter oder Voltmeter mit Spannungswandlern benutzt, in letzterem Falle kann der Eintritt eines Erdschlusses durch Signalglocke oder Sirene bemerkbar gemacht werden. Um die Lichtbogenbildung bei Erdschlüssen zu unterdrücken, benutzt man Erdungsölschalter, die automatisch die kranke Phase an Erde legen bzw. die Leitung bei dauerndem Erdschluß abschalten. Zu gleichem Zwecke empfiehlt neuerdings W. Petersen Nullpunktwiderstände und die Erdschlußspule. Diese werden in einem natürlichen oder künstlichen Nullpunkt des Netzes angeschlossen und saugen den kapazitativen Erdschlußstrom ab, wonach der Reststrom zur Bildung eines Lichtbogens nicht mehr ausreicht.

Literatur: W. Fellenberg, Richtl. f. d. Konstr. v. Stütz- u. Durchf.-Isolatoren. ETZ 1912, S. 582. — F. Marguerre, Einige Versuche mit Ölschaltern. ETZ 1912, S. 709. — W. Petersen, Überspannungen u. Überspannungsschutz. ETZ 1913, S. 167. — K. Kuhlmann, Das Überspannungsproblem. ETZ 1916, S. 661. — G. Schendell, Die Untersuchung d. Schalter- u. Transformatorenöle. ETZ 1918, S. 242. — W. Petersen, Begrenzung des Erdschlußstromes durch die Erdschlußspule. ETZ 1919, S. 5. — G. Gormann, Üb. d. Berechnung des Kurzschlußstromes in Leitungsnetzen. ETZ 1918, S. 444.

Bücher: siehe Schaltanlagen, S. 485.

Schaltanlagen.

(688) Allgemeine Gesichtspunkte. Der Mittelpunkt jeder elektrischen Einrichtung ist die Schaltanlage, von der aus die Energiezufuhr überwacht und die Verteilung in die einzelnen Verbrauchsstromkreise vorgenommen wird. Auf zweckmäßige Anordnung und solide, nicht billigste Ausführung ist besonderer Wert zu legen, da von der richtigen und übersichtlichen Anordnung zu einem großen Teil die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der ganzen Anlage abhängt. Dem Aufbau der Schaltanlagen ist in den letzten Jahren besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden. Man unterscheidet Hauptschaltanlagen für die Kraftzuleitungen und die Hauptverteilungsleitungen und Verteilungsschaltanlagen für die Verteilung der Licht- und Kraftleitungen zu den einzelnen Abnehmern. Die Hauptschaltanlagen bestehen aus der Bedienungsschaltwand oder aus Pulten und den dahinter liegenden Apparateräumen. Als Material für die Schaltwände verwendet man Marmor, Schiefer und andere feuersichere, isolierende Stoffe. Die Schaltwände werden durch Umrahmungen aus Metall abgeschlossen, die der Innenarchitektur des Gebäudes angepaßt sein sollen. In dieser Richtung sind in

den letzten Jahren Anlagen geschaffen worden, die auch in ästhetischer Hinsicht Auge und Gefühl befriedigen. Die Schaltwände enthalten Meßinstrumente, Zähler, Signaleinrichtungen und die Betätigungsvorrichtungen der von Hand oder durch Fernauslösung zu betätigenden Schalter. Es ist praktisch, oberhalb der Schaltwand ein Schaltbild der Anlage aus Metallstreifen einzulassen, dessen Schalter durch farbige Lampen gekennzeichnet sind, die bei Betätigung der Schalter mit ein- oder ausgeschaltet werden. Die Meßinstrumente werden in modernen Anlagen meistens in die Tafeln eingelassen und nach vorn durch Frontringe abgeschlossen. Die am häufigsten zu beobachtenden Instrumente sollen möglichst große Durchmesser und deutliche Skalen erhalten. Die Schaltwände werden entweder etwa 1 m über dem Maschinenhausfußboden oder in Höhe des ersten Stockwerkes angebracht. In letzterem Falle muß eine bequeme Treppe dem Schaltwärter Gelegenheit geben, schnell in das Erdgeschoß zu gelangen. Wählt man Pultform, so werden die Meßinstrumente als sog. Profilinstrumente ausgebildet. Vielfach werden auch beide Systeme angewandt in der Weise, daß für die zu den Maschinen gehörenden Apparate Pultform und für die der abgehenden Hauptleitungen Schaltwandform gewählt wird. Für gute, störenden Schatten ausschließende Beleuchtung der Schaltbühne ist Sorge zu tragen. Hinter der Schaltwand finden die notwendigen Apparate Aufstellung. Bei großen Kraftwerken für Hochspannung nehmen diese besondere Gebäude in Anspruch. Die Räume sind reichlich zu bemessen, damit Platz für späteren Einbau einzelner Apparate und für Erweiterungen vorhanden ist. Zu enge Schaltanlagen sind unübersichtlich und gefährlich für das Personal. Im allgemeinen sind beim Entwurf und Bau folgende Gesichtspunkte zu beachten: Einfachheit und Übersichtlichkeit der Anordnung. — Möglichste Vermeidung von Kreuzungen der Leitungen untereinander und mit geerdeten Eisenteilen. — Genügende Abstände der spannungführenden Teile voneinander und von Gebäude- und Konstruktionsteilen. — Schutz gegen zufällige Berührung. — Auswechselbarkeit der dem Verschleiß unterworfenen Teile. — Möglichkeit der sicheren Abschaltung einzelner Teile zu Ausbesserungs- und Reinigungszwecken. — Vermeidung scharfer Biegungen der Leitungen bei Hochspannung. — Derartige Anordnung der Apparate, daß unnötige Leitungswege vermieden werden. — Bequeme, leicht bedienbare Anordnung der Sicherungen. — Apparate, bei denen gelegentlich Lichtbogen entstehen, so anzuordnen, daß diese keinen Kurzschluß zwischen zwei Leitungen oder Erdschluß mit Konstruktionsteilen herstellen können. — Sichere Erdung aller Konstruktionsteile. — Vermeidung spannungführender Teile an der Vorderwand der Schalttafel. — Vermeidung der sog. Provisorien. — Beschränkung auf nur durchaus nötige Stützpunkte für Leitungen. — Rücksichtnahme auf möglichst kurze Bedienungswege für öfter zu betätigende oder nachzusehende Apparate. — Möglichkeit des luftdichten Abschlusses einzelner Anlageteile bei Bränden. — Abflußmöglichkeit für ausfließendes Öl. — Schaffung zuverlässiger Beleuchtung auch bei Betriebsstörungen. — Möglichkeit des schnellen und bequemen Transportes größerer Apparate.

Für größere Verteilungsschaltanlagen gilt das oben Angeführte sinngemäß. Kleinere Verteilungsanlagen werden neuerdings aus einzelnen, vollständig geschlossenen Schaltkästen zusammengebaut, die außerordentlich praktisch sind.

Ganz kleine Verteilungsschalttafeln für einzelne Gebäude usw. bestehen aus genügend weit von der Wand befestigten Platten aus Isolierstoff, die alle erforderlichen Schalter, Sicherungen, Meßinstrumente und Zähler enthalten. Die Schalter sind mit isolierenden Schutzkästen, die Sicherungen außerdem mit Bezeichnungen der zu versorgenden Räume versehen. Die Schalttafel erhält eine dicht schließende Schutzverkleidung. Blanke, spannungführende Teile auf der Vorderseite der Tafel sind zu vermeiden; alle Zu- und Ableitungen müssen von vorn lösbar sein, wofür besondere Schalttafelklemmen Verwendung finden.

(689) Schaltanlagen für Niederspannung. Während früher die Apparate auf der Vorderwand der Schalttafel angeordnet wurden, ist man hiervon fast ganz abgekommen. Auf der Tafel befinden sich nur noch die Handgriffe für Schalter, Signalvorrichtungen, Zähler, Meßinstrumente, Handräder für Regulatoren und automatische Zellenschalter, manchmal auch diese selbst. Die Apparate und die Sicherungen werden hinter der Schalttafel eingebaut. Versieht man den unteren Teil der Schaltwand mit eisernen Rolljalousien, so läßt sich die Bedienung der Sicherungen auch von vorn vornehmen. Da die Leitungen meist starke Ströme führen, ist auf deren Anordnung und Verlegung besonderes Gewicht zu legen. Alle Kontakte sind sorgfältigst zu behandeln. Bei Schienenverbindungen ist außer der Verzinnung noch als Zwischenlage Stanniol oder Metallfolie zu verwenden. Die Häufung von Leitungen oder Kabeln, die zu verschiedenen Speiseleitungen führen, ist zu vermeiden, oder Sorge zu tragen, daß bei dem Kurzschluß einer Leitung nicht sämtliche andere in Mitleidenschaft gezogen werden. Für einen genügend großen Vorrat der abnutzbaren Teile ist stets zu sorgen. Zur Vermeidung langer und teurer Leitungen sind die Zellenschalter für die Akkumulatoren in einem gut verschließbaren Vorraum des Batterieraumes aufzustellen und mit Fernbetätigung von der Schalttafel aus einzurichten. Die im Batterieraum entstehenden Gase dürfen keinesfalls in die Schalträume gelangen. Die Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Apparaten auf einen möglichst engen Raum aus Sparsamkeitsgründen zusammenzudrängen, ist durchaus zu verwerfen. Die Isolation der Anlage ist dauernd zu überwachen; Erdschlußfehler dürfen erst gar nicht zur Ausbildung kommen. Das öftere Nachziehen der Schraubverbindungen ist zu empfehlen. Die Bedienung größerer Niederspannungsanlagen erfordert oft mehr Verständnis, Ruhe und Überlegung als die von Hochspannungsanlagen. Es ist daher bei Anordnung der Schalter mit Rücksicht auf die oft großen Stromstärken darauf zu achten, daß Verwechslungen der Schalter ausgeschlossen sind. Auch für größere Niederspannungsanlagen hauptsächlich in Fabriken hat sich das System der Schaltkästenanordnung neuerdings eingeführt.

(690) Schaltanlagen für Hochspannung. Diese erfordern verhältnismäßig große Räume. Bei großen Kraftwerken sind sie vom eigentlichen Maschinenhaus oft völlig getrennt. Die Befehle vom und zum Maschinenhaus werden dann optisch und akustisch durch besondere Signalapparate vermittelt. Die Schaltapparate sind stets in besonderen Räumen hinter der Schaltwand angebracht. Diese enthält die Betätigungs- und Signalvorrichtungen, sowie Meßinstrumente, eventuell Schnellregler, Auslöserelais, Zähler und Handräder für Erregung bzw. Magnetregulatoren. Der Bedarf an Meßinstrumenten ist größer als bei Niederspannungsanlagen. Zu jedem Generator gehören Wattmeter, Strommesser für diesen und die Erregung, zu den Transformatoren und den Fernleitungen Strommesser, die für die letzteren zweckmäßig direkt in allen Phasen oberhalb des Ölschalters einzubauen sind. Sie sind dann gegen Berührung zu schützen. Außerdem sind erforderlich Synchronisiervorrichtung, bestehend aus 2 Glühlampen, 3 Voltmetern, Frequenzmesser, Voltmeter für die Sammelschienen; zu empfehlen ferner Phasenmesser, selbstschreibende Watt- und Voltmeter für die Sammelschienen. Die Parallelschaltvorrichtung kann auch an freistehenden Säulen oder beweglichen Wandarmen angeordnet werden (Abb. 431). Besondere Überlegung erfordert die Anordnung der Apparate. Diese werden in Zellen eingebaut, die voneinander durch Isolierwände getrennt und nach vorn mit Schutzgittern oder Stangen versehen sind. Neuerdings werden die Ölschalter in besondere Kammern eingebaut; die Begehung erfolgt von einem gemeinsamen Mittelgang aus, der auch die nötigen Sammelschienen, Trennmesser usw. enthält (Abb. 432). Vor und hinter jedem Ölschalter sind Trennmesser vorzusehen, um eine gefahrlose Besichtigung der Schalter zu gewährleisten. Schalter sind zweckmäßig in allen Phasen mit Überstromauslösern zu versehen. Schalter für Transformatoren und lange Strecken erhalten Vorschaltkontakte, um die Entstehung von Wanderwellen zu vermeiden. Der Überstromschutz bedarf sorgfältigster

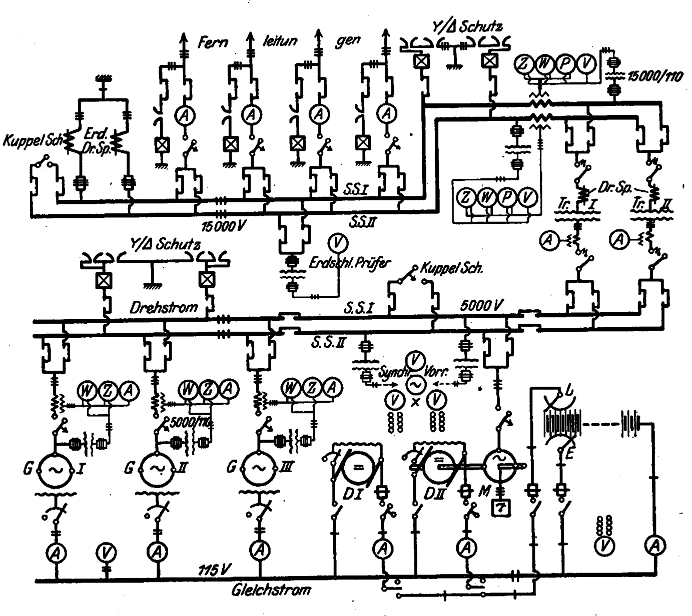


Abb. 431. Schaltanlage für Hochspannung.

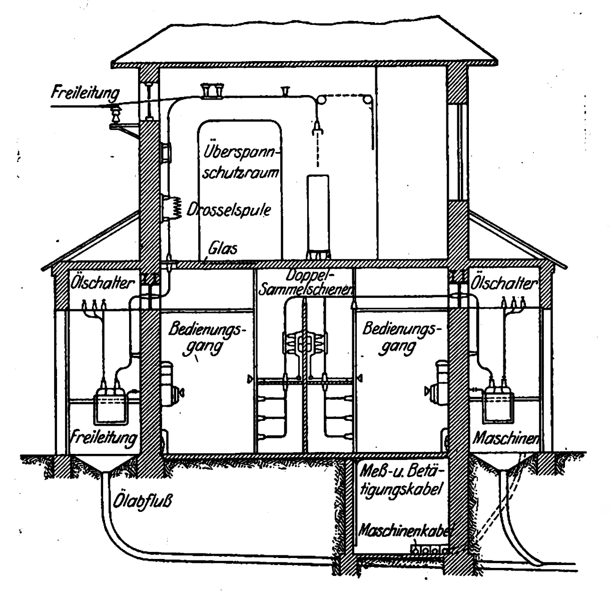


Abb. 432. Schalthaus.

Überlegung und Behandlung. Eine restlose Lösung dieser Aufgabe für größere Freileitungsnetze ist noch nicht gelungen. Auch die Überspannungsfrage bedarf noch endgültiger Klärung. Zur Verwendung kommen als Schutz gegen statische Ladungen an die S. S. angeschlossene Wasserstrahlerder oder besser Erdungsdrosselspulen; gegen Überspannungen durch atmosphärische Induktionswirkungen oder Schaltwellen Hörnerableiter mit Dämpfungswiderständen, Kondensatoren, Drosselspulen und Überbrückungswiderstände. Anlagen für hohe Spannungen (100 kV und darüber) bedürfen kaum eines besonderen Überspannungsschutzes. Sammelschienen werden vorteilhaft als Doppelsammelschienen ausgebildet, wobei die Möglichkeit der Kupplung beider durch einfachen Ölschalter (nicht Trennschalter) empfehlenswert ist. Scharfe Ecken und Biegungen sind bei Führung der Leitungen, die aus Drähten oder Röhren bestehen, zu vermeiden. Die Verbindungen erfolgen durch Konusschraubverbinder, die guten Kontakt geben und leicht lösbar sind. Die Abstände der Leitungen gegeneinander und gegen Erde sind reichlich zu wählen. Glatte, genügend hohe Stützisolatoren haben sich vorzüglich bewährt. Transformatoren werden in besonderen, abschließbaren Räumen aufgestellt. Die Zu- und Abschaltung dieser erfolgt am besten durch Ölschalter ohne Stromauslöser, nicht durch Trennmesser. Auslöse- und Signalleitungen sind durch unabhängige Stromquellen zu speisen. Für Transformatoren sind Fernthermometeranlagen empfehlenswert, um jederzeit Einblick in die Erwärmung der Transformatoren zu haben.

Literatur: M. Neustätter, Die Hochsp.-Kraftübertr. d. Hidroelectrica Espanola. ETZ 1911, S. 535. — E. G. Fischinger, Die erste 110 000 Voltanlage in Europa. ETZ 1911, S. 815. — P. W. Sothmann u. J. Teichmüller, Die mit 110 000 Volt arbeitende U. Z. des Staates Ontario. ETZ 1911, S. 941; 1912, S. 423. — A. Feldsmann, Die Hochsp. U. Z. d. Steinkohlenbergwerkes Rheinpreußen. ETZ 1912, S. 1223. — Über die Verwendung von Duroplatten in elektrischen Schaltanlagen. ETZ 1913, S. 829. — Hochsp.-Unterwerke im Freien. ETZ 1913, S. 1404. —W. E. Mitschell, Außenunterwerke der Alabama Power Co. ETZ 1914, S. 781. — E. Treiber, Das Kraftwerk an d. Möhnetalsperre. ETZ 1916, S. 155. — L. Steiner, Die elektr. Anlagen d. Gewerkschaft „Vereinigte Welheim". ETZ 1916, S. 509. — L. Gorini, Kraftübertragungsanlage mit 80 000 Volt d. Energia Electrica de Cataluna, Barcelona. ETZ 1917, S. 62. — Kraftübertragungsanlagen in der Umgegend von Barcelona. ETZ 1918, S. 87. — H. Probst, Neuere Schaltanlagen. ETZ 1918, S. 141.

Bücher: W. Petersen, Hochspannungstechnik. Verl. F. Enke, Stuttgart. — J. Teichmüller, Lehrgang d. Schaltungsschemata elektr. Starkstromanlagen. I. Gleichstrom, II. Wechselstrom. Verl. R. Oldenbourg, München. — H. Zipp, Handbuch d. elektr. Hochsp.-Technik. Verl. O. Leiner, Leipzig. — R. Edler, Taschenbuch der Schaltungen aus d. Gebiet d. Starkstromtechnik. Verl. Jänecke, Leipzig.

Schutzmaßnahmen in Hochspannungsanlagen.

(691) Schaltanlagen. Da der nachfolgende Betriebsstrom bei Durch- oder Überschlägen infolge von Überspannungen schwere Beschädigungen der Apparate hervorruft, sind Maßnahmen zu deren Verhütung notwendig. Die in einer Anlage selbst erzeugten Überspannungen bei Fehlschaltungen, Erd- und Kurzschlüssen, ungeschickten Schaltungen usw. lassen sich ihrer Gefährlichkeit zum Teil schon durch eine durchdachte Anordnung der Schaltanlage berauben. Das häufige Auslösen der Schalter durch kurzzeitige Netzstörungen kann man durch geeignete Ausbildung des Überstromschutzes auf das kleinste Maß verringern. Da moderne Generatoren und Transformatoren ohne Schaden kurze Zeit kurzgeschlossen laufen können, läßt man diese zweckmäßig nur bei Kurz- oder Erdschlüssen innerhalb der Schaltanlage selbst auslösen, verriegelt sie aber gegen die aus dem Netz kommenden Störungen, die nur den betreffenden Streckenschalter zur Auslösung bringen dürfen. Die Transformatoren erhalten Schalter ohne Auslösung, jedoch mit Vorschaltwiderständen; das Ausschalten durch Trennmesser ist zu vermeiden, da infolgedessen leicht ein Lichtbogen stehen bleibt. Das Kuppeln von Sammelschienen gleicher Spannung erfolgt durch Kuppelschalter und nicht durch Trennmesser. Das Einlegen von Schaltern ohne Vorschaltwiderstand geschehe mit einer gewissen Langsamkeit. Der Unterschied zwischen langsamem und schnellem

Einschalten läßt sich an den Amperemetern überzeugend feststellen. Größere Umschaltungen während des Betriebes nehme man nur im Notfalle vor und lasse diese nur durch technisch vorgebildetes Personal ausführen. Die durch die steile Stirn der Wanderwellen besonders gefährdeten Spannungs- und Stromwandler sowie Auslösemagnete erhalten induktionsfreie Vorschalt- bzw. Überbrückungswiderstände oder Funkenstrecken. Die Transformatoren schützt man durch Drosselspulen mit parallel geschalteten Ohmschen Widerständen oder durch Kondensatordrosselspulen. Zusatztransformatoren erhalten oft parallel dazu geschaltete Kondensatoren zur Umleitung der hochfrequenten Überspannungen. Zur Umwandlung der Überspannungsenergie in Wärme verwendet man Hörnerableiter in der Form als Feinschutz (Stern-Dreieckschutz), der an die Sammelschienen angeschlossen wird. Die Stromstärke wird begrenzt durch Widerstände unter Öl, die zwischen Horn und Sammelschiene, nicht aber zwischen Horn und Erdleitung zu legen sind. Die aus dem Netz kommenden, bei Schneesturm, scharfem Wind, Sonnenauf- und -untergang usw. auftretenden statischen Ladungen werden durch Wasserstrahlerder oder neuerdings meist durch Erdungsdrosselspulen abgeführt (685). Diese werden wirksamer an die Sammelschienen und jede Phase als an den Nullpunkt der Transformatoren angeschlossen. Beabsichtigt man, die aus dem Netz herrührenden hochfrequenten Überspannungen für die Schaltanlage unwirksam zu machen, können Kondensatoren verwendet werden, die als Wellenreflexionspunkt wirken. Die gleichzeitige Verwendung von Hörnerableitern und Kondensatoren in derselben Schaltanlage ist wegen der Gefahr der Bildung eines neuen Schwingungskreises nicht ohne weiteres rätlich.

(692) Hochspannungsnetze. Freileitungsnetze sind Störungen durch meteorologische Einflüsse, Fehlschaltungen und mechanische Ursachen besonders ausgesetzt. Von besonderer Wichtigkeit ist hier eine sorgfältige, auf den Erfahrungen in der Praxis aufgebaute Bauausführung, durch die bereits manche Störungsquelle vermieden wird. Die Abstände der Leitungen untereinander und von Konstruktionsteilen müssen genügend groß sein, wobei wegen der Vogelgefahr auf reichliche Höhe der Stützen zu sehen ist; bei Mehrleiterstrecken mit verschiedenen Querschnitten sind die Durchhänge richtig zu bemessen, um ein Zusammenschlagen der Drähte bei Rauhreif oder Sturm zu verhindern. An den durch Wald führenden Strecken ist reichlich auszuholzen. An einen Ölschalter sollen höchstens 60 km Freileitung angeschlossen werden. Speiseleitungen sind nicht anzuzapfen. Für dauernden guten Kontakt der Schaltflächen der an geeigneten Stellen einzubauenden Mastschalter ist zu sorgen, da sonst empfindliche Lichtschwankungen, ungleiche Belastung der Phasen, sowie starke Geräusche in benachbarten Telephonleitungen auftreten. Die Mastschalter sollen zur Erleichterung von Schaltmanövern möglichst in der Nähe von Telephonanschlüssen liegen. Besondere Sorgfalt ist auf die Ausführung und Kontrolle der Erdungen zu verwenden. Eine einwandfreie Lösung der Erdungsfrage wurde noch nicht erreicht. Vielfach wird der erhebliche Wert der Erdschlußstromstärke in großen Netzen nicht genügend beachtet, z. B. bei Bemessung der Erdleitungen, der Widerstände von Hörnerableitern u. a. m. Um ein Stehenbleiben des Erdschlußlichtbogens zu verhüten, unterteilt man große Netze durch Transformatoren im Verhältnis 1 : 1, oder baut Erdschlußspulen nach Petersen (687) ein. In beiden Fällen läßt sich die Erdschlußstromstärke derart herabsetzen, daß sie zur Unterhaltung eines Lichtbogens nicht mehr ausreicht. In welchem Umfange und wo in einem Netze Apparate zur Ableitung der Überspannungen einzubauen sind, ist schwer zu bestimmen. Meistens kann man die zweckmäßigsten Stellen erst nach einiger Betriebszeit feststellen. Kennzeichnet man alle vorkommenden Netzstörungen durch farbige Nadeln auf dem Netzplan, so erhält man nach einigen Jahren von den Punkten Kenntnis, die besonders gefährdet sind. Am häufigsten verwendet man Hörnerableiter mit Öl- oder Emaillewiderständen, die in passend gelegenen Transformatorstationen untergebracht werden. Öftere Kontrolle der Ableiter ist nötig, da Zerstörungen der Widerstände durch Über-

lastung und Witterungseinflüsse häufig vorkommen. Durch gewitterreiche Gegenden führende Strecken können nach Petersen durch ein geerdetes Eisenseil oberhalb der Leitungen geschützt werden. Die Tendenz des modernen Überspannungsschutzes zielt auf Einbau möglichst weniger Apparate und Erhöhung des Sicherheitsgrades der Anlagen. Sehr wichtig ist ein guter Überstromschutz, der bei Störungen nur den kranken Netzteil, nicht aber unbeteiligte Strecken zum Auslösen bringen darf. Bei ausgedehnten Netzen ist diese Bedingung nicht immer leicht zu erfüllen. Augenblicklich ist man bemüht, den Überstromschutz auf eine neue Grundlage zu stellen. Die in alle Phasen einzubauenden Stromauslöser bedürfen sorgfältiger Überwachung und Neueinstellung, sobald sich Schalt- oder Belastungsvoraussetzungen ändern. Werden Netzteile als Ringleitungen betrieben, so sind an geeigneten Stellen automatische Auftrennschalter einzubauen, damit nur der kranke Teil der Ringleitung sich abschaltet.

Aufmerksamkeit bedarf auch die Einrichtung der Netztransformatorenhäuser. Die Transformatoren sind mit Windungsschutz, d. h. verstärkter Isolierung zu versehen, da die auftretenden Wanderwellen in den Eingangswindungen der Transformatoren bedeutende Spannungserhöhungen hervorrufen [(115), S. 99]. Dicht über den Transformatoren sind witterungsbeständige und kurzzeitig überlastbare Drosselspulen einzubauen. Ihr Einbau dicht unterhalb der Leitungseinführung in das Transformatorhaus ist wegen der möglichen Ausbildung eines neuen Schwingungskreises zu vermeiden. Da die Stationen oft Wellenreflexionspunkte im Netz bilden, sind die Stützisolatoren reichlich zu bemessen und in der Anzahl möglichst zu beschränken. Glatte Stützen haben sich im allgemeinen am besten bewährt. Eine gute Belüftung der Stationen derart, daß der Eintritt von Straßenstaub jedoch verhindert wird, ist wichtig, anderenfalls entstehen infolge des Kondensationsvorganges bei Witterungsumschlägen leicht Überschläge an den Stützern und Sicherungsböcken. Neuerdings geht das Bestreben dahin, die bisher verwendeten Hochspannungssicherungen durch automatische Kleinölschalter zu ersetzen.

Schließlich gehört zu den Schutzmaßnahmen in Hochspannungsanlagen ein tadellos organisierter Revisions- und Störungsdienst, auf dessen Durchbildung die größte Mühe zu verwenden ist.

Der Schutz von Hochspannungskabelnetzen gegen Überspannungen gestaltet sich einfacher und sicherer, da die meteorologischen Einflüsse fortfallen. Als Schutz gegen auftretende Wanderwellen bei Fehlschaltungen, Über- oder Durchschlägen an den angeschlossenen Apparaten wählt man hauptsächlich den Hörnerfeinschutz. Die Ölschalter für Kabelstrecken werden zweckmäßig mit Vorschaltwiderständen versehen; das Abschalten durch Trennmesser ist nicht rätlich. Für Abführung der Restladungen in den Kabeln ist Sorge zu tragen, bevor an diesen gearbeitet wird. Kabelstrecken ermöglichen die Anwendung des vorzüglichen Differentialschutzes gegen Überströme, da die besonderen Meßleitungen in die Kabel eingeschlossen werden können.

Literatur: W. Petersen, Der Schutzwert v. Blitzseilen. ETZ 1914, S. 1. — L. Binder, Schaltvorgänge u. elektr. Wanderwellen. ETZ 1914, S. 177. — W. Prehm, Übersp.-Schutz in Theorie u. Praxis. ETZ 1914, S. 417. — W. Linke, Schaltvorg. b. elektr. Masch. u. Transf. ETZ 1914, S. 757. — Bendmann, Betriebsregul. von Leitg.-Netzen d. Max. Zeitrelais. ETZ 1914, S. 845. — J. Mayer, Zur Blitzschutzfrage. ETZ 1914, S. 975. — E. Pfiffner, Übersp.-Schutz d. Drosselspulen u. Kondensatoren. ETZ 1914, S. 1101. — L. Binder, Messung. üb. d. Form d. Stirn- u. Wanderwellen. ETZ 1915, S. 241. — W. Petersen, Überströme u. Überspannungen in Netzen mit hohem Erdschlußstrom. ETZ 1916, S. 129. — K. Kuhlmann, Das Überspannungsproblem. ETZ 1916, S. 661. — W. Petersen, Der aussetzende Erdschluß. ETZ 1917, S. 553. — Bücher: Benischke, Schutzvorrichtungen d. Starkstromtechnik geg. atmosph. Entladungen. — W. Petersen, Überspannungen u. Übersp.-Schutz. — K. Kuhlmann, Grundzüge des Übersp.-Schutzes in Theorie u. Praxis.

Siebenter Abschnitt.

Elektrische Beleuchtung.

(693) Die Erzeugung des elektrischen Lichtes. In den elektrischen Lichtquellen wird fast ausschließlich die Temperaturstrahlung verwendet. Diese beruht darauf, daß Stoffe mit sehr hohem Schmelzpunkt durch elektrische Energie zur Weißglut erhitzt werden und Energie als sichtbare Strahlung aussenden. Zum geringeren Teil tritt zu dem Temperaturleuchten auch das Lumineszenzleuchten in einigen elektrischen Lichtquellen, bei denen verdünnte Gase unter hoher elektrischer Spannung zur Strahlung gelangen.

Die Hauptvertreter der elektrischen Lichtquellen sind die Glühlampen und Bogenlampen. Von ersteren sind es neben den stetig weiter zurücktretenden Kohlenfadenlampen vor allen die Metallfadenlampen, von letzteren sind es überwiegend die Flammen- und Effektbogenlampen, die in der Praxis Bedeutung haben neben den Lampen mit Reinkohlen in Scheinwerfern.

Bei sämtlichen Glühlampen nimmt die Leuchtkraft im Laufe des Betriebes ab. Als Nutzbrenndauer einer Glühlampe bezeichnet man diejenige Zeit, innerhalb deren die Leuchtkraft um 20 % der ursprünglichen abgenommen hat. Da bei den Metallfadenlampen während des Betriebes ein Durchschmelzen und darauf folgendes Zusammenschweißen unter gleichzeitiger Verkürzung der Fadenlänge eintreten kann, ist es auch möglich, daß die Leuchtkraft einer solchen Lampe während des Betriebes zunimmt.

Das Lumineszenzleuchten findet zum Teil Anwendung in der Quecksilberdampflampe. Wegen der ausgesprochen grünen und violetten Strahlung und der Abwesenheit jeglicher langwelligen, roten Strahlung hat diese Art der Lichterzeugung nur beschränkte praktische Anwendung gefunden. Auch das nach dem Grundsatz von Geisler und Tesla erzeugte Moore-Licht (Electrical Engineer New York, Bd. 21, S. 430, 438, 558, 595 — ETZ 1905, S. 187. — Wedding, ETZ 1910, S. 501) unter Anwendung hochgespannter Wechselströme in Glasröhren mit verdünnten Gasen hat nur beschränkte Anwendung gefunden.

(694) Spezifischer Verbrauch und Lichtstärke. Der spezifische Verbrauch stellt das Verhältnis der von der Lampe aufgenommenen Leistung in Watt zu der von der Lampe entwickelten Lichtstärke in HK dar, also den Verbrauch für 1 HK. Bei solchen Angaben ist darauf zu achten, ob sich die Lichtstärke auf die horizontale sichtbare Strahlung, die mittlere, in der unteren Halbkugel oder die mittlere in der ganzen Kugel um die Lampe als Mittelpunkt entwickelte Strahlung bezieht.

Die Frage, ob es richtiger sei, bei den Bezeichnungen für Lichtquellen den Lichtstrom statt der Lichtstärke und statt des spezifischen Verbrauches den Lichtstrom für die Einheit der Leistung, in Lm/W, anzugeben, unterliegt z. Z. noch der Erwägung und sollte am besten auf internationaler Vereinbarung fußen.

Glühlampen.

1. Glühlampen mit Kohlenfaden-Glühkörper.

(695) Konstruktion. Der Glühkörper wird aus reiner, künstlich hergestellter, strukturloser Zellulose gewonnen, indem die Lösung durch entsprechend feine Düsen gespritzt und als langer, feiner Faden hergestellt wird. Die entsprechenden

Längen von gleichem Querschnitt werden über einem erwärmten Dorn in Bügel- oder Spiralform gebogen und in Kohlenretorten unter Luftabschluß bei hoher Weißglut in leitenden Zustand gebracht. Zum Ausgleich etwaiger Mängel in der Oberfläche und im Querschnitt werden sie weiter in Kohlenwasserstoffen zum Glühen gebracht (egalisiert). Das Einkitten der Fäden an der Stromzuführungs- und -ableitungsstelle macht große Schwierigkeiten, auch wegen des Kittes selbst. Der Glühkörper wird je nach seiner Länge auch noch im Innern der Glashülle verankert.

(696) Verhalten im Betrieb. Lichtstärke, Spannung, gesamter und spezifischer Verbrauch sind für die hauptsächlichsten Arten von Kohlenfadenglühlampen in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. Glühlampen mit Kohlenfaden.

Lichtstärke HK	Betriebsspannung V	W	W/HK	Lichtstärke HK	Betriebsspannung V	W	W/HK
5	45 – 112	20	4,0	16	45 – 115	53	3,3
5	116 – 125	23	4,5	16	116 – 240	61	3,8
10	45 – 115	35	3,5	25	45 – 115	83	3,3
10	116 – 155	38	3,8	25	116 – 240	95	3,8
10	156 – 240	43	4,3	32	45 – 115	105	3,3
				32	116 – 240	122	3,8

Kohlenfadenlampen mit einer Lichtstärke über 32 HK sind unwirtschaftlich und haben keine praktische Bedeutung gewonnen.

Im allgemeinen liegt der spezifische Verbrauch der Kohlenfadenglühlampen zwischen 3,5 und 4,5 W/HK bei einer Nutzbrenndauer von 800—1000 h. Bei gleichem spezifischen Verbrauch nimmt die Lebensdauer mit höherer Spannung ab, während bei gleicher Lebensdauer der spezifische Verbrauch mit höherer Spannung zunimmt.

Die Zunahme der Lichtstärke mit der Spannung und den zugehörigen Verbrauch für eine 16 HK-Lampe bei 110 V und bei 220 V zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2. Glühlampen mit Kohlenfaden.

Abhängigkeit der Lichtstärke von der Spannung.

Lampensorte	V	A	HK	W/HK	Lampensorte	V	A	HK	W/HK
Normal 16 HK 110 V	105	0,49	12,2	4,1	Normal 16 HK 220 V	210	0,255	12,0	4,5
	108	**0,50**	**14,5**	**3,7**		**216**	**0,263**	**14,5**	**3,9**
	110	**0,51**	**16,0**	**3,5**		**220**	**0,270**	**16,0**	**3,7**
	112	**0,52**	**18,0**	**3,3**		**224**	**0,278**	**18,0**	**3,5**
	115	0,54	21,0	3,0		230	0,285	21,0	3,1
	120	0,57	26,5	2,6		235	0,295	24,5	2,8
	125	0,60	32,8	2,3		240	0,305	27,5	2,6

Für die in der Praxis zugelassenen Spannungsschwankungen von ± 2 % zeigen die fett gedruckten Zahlen die Veränderungen in der Stromaufnahme, der Lichtstärke und dem spezifischen Verbrauch.

Die Hintereinanderschaltung findet nur für Lampen kleinerer Lichtstärke und geringerer Spannung, z. B. bei Reklamebeleuchtung und vereinzelt bei Wechsel-

strom mit Drosselspulen wie am Kaiser-Wilhelm-Kanal (628), (Handbuch der el. Beleuchtung von Herzog und Feldmann 1901, S. 603) statt.

(697) Lampenformen. Die häufigste Form des Glaskörpers ist die Birne mit einem oder zwei bügelförmigen oder einem spiralig gewundenen Faden. Auch die Kugelform wird oft angewendet. Seltener sind Kerzen-, Röhren-, Pilz-, Fokus-, Reflektor- und andere Lampen. Die Fassungen sind überwiegend Edison- (normal und klein), in einzelnen Fällen auch Swan-(Bajonett-)Fassungen.

(698) Lampen mit metallisiertem Kohlenfaden. Erhitzt man den Faden der gewöhnlichen Glühlampe von 1900—2000° höher bis auf 3000—3700°, so nimmt der bisherige negative Temperaturkoeffizient positive Werte an. Diese metallisierten Fäden haben indessen nur vorübergehende Bedeutung gehabt.

2. Glühlampen mit Metalloxyd-Leuchtkörpern.

(699) Nernst-Lampe. Die Oxyde der seltenen Erden wie Thorium, Zirkon, Yttrium, Cer u. a. sind als Leiter zweiter Klasse als feine Stäbchen oder Röhren nach hinreichender Anheizung bei einer Temperatur von etwa 2300° freiglühend zu heller Weißglut gebracht worden, finden aber jetzt nur noch vereinzelt z. B. für Projektionszwecke Anwendung.

3. Glühlampen mit Metall-Leuchtkörpern.

(700) Arten. Nachdem man erkannt hatte, wie die sichtbare Strahlung mit steigender Temperatur anwuchs und Mittel und Wege gefunden worden waren, sehr schwer schmelzbare Metalle wie Osmium, Tantal, Wolfram u. a. teils in fein verteiltem Zustande auf chemischem Wege, teils als feine Drähte auf elektrischem und mechanischem Wege zu gewinnen und zu Glühkörpern zu formen, hat die Einführung der Metallfaden- bzw. Drahtlampe einen gewaltigen Aufschwung in allen Ländern der Welt genommen.

Auer v. Welsbach spritzte aus einer knetbaren Masse von fein verteiltem Osmium und Kohle Fäden, aus denen er in Bügelform für etwa 30 V Metallbügel aus reinem Osmium herstellen konnte. Ihm folgte das Glühlampenwerk von Siemens & Halske und zog aus elektrisch niedergeschmolzenem, reinen Tantal lange feine Fäden und fand gleichzeitig eine Methode, um den langen Faden für 110 V und mehr in der kleinen Glühbirne auf einem Wickelgestell in einheitlicher Form unterzubringen. Diese Methode wird jetzt fast allgemein benutzt, um den später nach einem Ziehverfahren hergestellten Wolframfaden oder -draht zu einem Glühkörper zu formen.

(701) Wolframlampe. Der Glühkörper kann nach folgenden Verfahren hergestellt werden:

a) Pasteverfahren. Zunächst wird das fein gepulverte Wolframmetall durch ein zähflüssiges organisches Bindemittel, z. B. Gummi, Stärke, Zucker oder dgl., zu einer zähen Paste verrührt. Diese wird durch Pressen aus Düsen zu äußerst feinen Fäden geformt, die Fäden werden getrocknet und bei mäßiger Temperatur im Vakuum geglüht, wobei das Bindemittel verkohlt. Hierauf werden die Fäden in einer Atmosphäre, die große Mengen reduzierender Gase, z. B. Wasserstoff, neben geringen Mengen oxydierender Gase, z. B. Wasserdampf, enthält, mittels elektrischen Stromes unter allmählich gesteigerter Erwärmung, schließlich längere Zeit bei Weißglut erhitzt und hierdurch der reine Metallfaden erhalten.

b) Kolloidverfahren. Das Wolframmetall wird zunächst in den kolloidalen Zustand übergeführt, z. B. indem ein Lichtbogen zwischen Elektroden aus Wolframmetall unter Wasser gebildet wird (Bredig, Zeitschr. f. Elektrochem. 1898, S. 514). Das hierbei nach Ausdrücken des Wassers erhaltene

homogene und plastische Wolfram-Kolloid wird durch feine Düsen zu Fäden gepreßt. Die Fäden werden in einer gegen Oxydation schützenden Atmosphäre, z. B. Wasserstoff, mittels elektrischen Stromes allmählich auf Weißglut gebracht, wobei sie sintern und zum metallischen Leiter in Form eines feinen elastischen Fadens werden.

c) Ziehverfahren. Pulverförmiges Wolframmetall oder ein Wolframat, insbesondere Nickelwolframat, wird mit einem Zusatz eines leichter schmelzbaren Stoffes, z. B. Nickel in etwa 5 bis 20%, innig gemischt und gewalzt und läßt sich nun zu feinem Draht ziehen. Hierauf wird der Zusatz z. B. durch elektrische Erhitzung im Vakuum ausgetrieben und hierdurch der reine gezogene Faden aus Wolframmetall erhalten.

d) Das Ziehen des Wolframdrahtes kann auch ohne Beimengung anderer Stoffe erfolgen, indem man Wolframtrioxyd zu feinem Wolframpulver reduziert, dieses unter sehr hohem Druck zu Stäben preßt, in einem Formiergas unter starkem Schwinden glüht und aus dem sehr harten Wolframstab feine Fäden zieht (engl. Patent 23499/1909).

e) Die Pintsch A.-G. läßt einen gespritzten Wolframfaden in einer entsprechenden Atmosphäre so schnell und bei solcher Erhitzung ablaufen, daß die Kristallbildung als sechskantige Säule fortlaufend stattfindet und der Faden als eine Art endloser Kristall entsteht.

Andere als Glühkörper vorgeschlagene, besonders schwer schmelzbare Metalle haben bisher keine Einführung gefunden.

Für eine Spannung von 110 V lassen sich Wolframlampen bis herab auf etwa 6 HK herstellen, während die Lichtstärke aufwärts bis etwa 4000 HK geht. Bei der Herstellung der Wolframlampen für hohe Lichtstärken ist man dazu übergegangen, den langen, geradlinig ausgespannten Draht in sehr feine, enge Spiralen zu wickeln, die gut verankert sind. Dies ergibt die sogenannten Spiraldrahtlampen; und weiter braucht man die Glasglocken der Lampen nicht luftleer zu pumpen, sondern füllt sie mit indifferenten Gasen wie Stickstoff bei Atmosphärendruck und erhält alsdann gasgefüllte Lampen. Die Spiraldraht- und gasgefüllten Lampen haben einen überhitzten Faden und dementsprechend einen geringeren spezifischen Verbrauch, aber auch eine geringere Lebensdauer als die gewöhnlichen Drahtlampen.

Der spezifische Verbrauch der gewöhnlichen Wolframlampen liegt bei 1,0 bis 1,35 W/HK und kann rund mit 1,25 W/HK angenommen werden; derjenige der sogenannten Halbwattlampen liegt bei 0,6 bis 0,7 W/HK. Die Lebensdauer der ersteren beträgt etwa 1000 h, die der zweiten etwa 500 h.

Lichtstärke und spezifischen Verbrauch der gewöhnlichen Wolframlampe bei veränderlicher Spannung zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3. Wolframlampe.

Lampensorte	V	A	HK	W/HK
Normal 50 HK 220 V	160	0,262	14	3,0
	180	0,281	23	2,2
	200	0,315	37	1,7
	210	0,317	47	1,4
	220	**0,319**	**54**	**1,3**
	230	0,321	67	1,1
	240	0,325	78	1,0
	260	0,392	113	0,9
	280	0,477	167	0,8

(702) Metallfadenlampen mit Spartransformatoren. In Wechselstromnetzen lassen sich Lampen von geringer Lichtstärke und Spannung mit Vorteil verwenden, da solche Lampen mit dem kürzeren und festeren Faden eine größere mechanische Festigkeit besitzen als die Lampen von geringer Lichtstärke und hoher Spannung. Die Lampen werden je nach der geforderten Spannung parallel an einen Teil einer an die volle Netzspannung gelegten, entsprechend gebauten Drosselspule (Reduktor, Divisor, Kleintransformator) gelegt. Der Leerlauf solcher Transformatoren wird dadurch vermieden, daß sie im primären Stromkreis ein- und ausgeschaltet werden, wie dies aus der Abb. 433 zu ersehen ist. *PP* stellt den Anschluß primär, *SS* den Anschluß sekundär und *GG* den gemeinsamen Anschluß an das Netz dar.

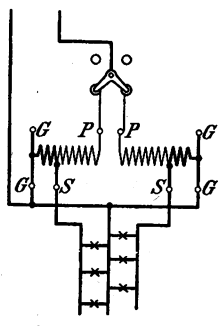


Abb. 433. Kleintransformatorschaltung.

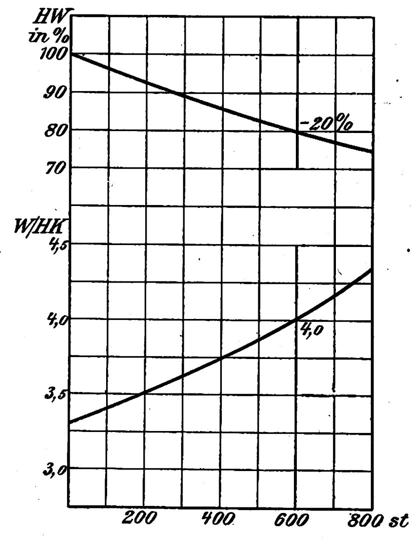


Abb. 434. Lichtstärke und spezifischer Verbrauch der Kohlenfadenlampe.

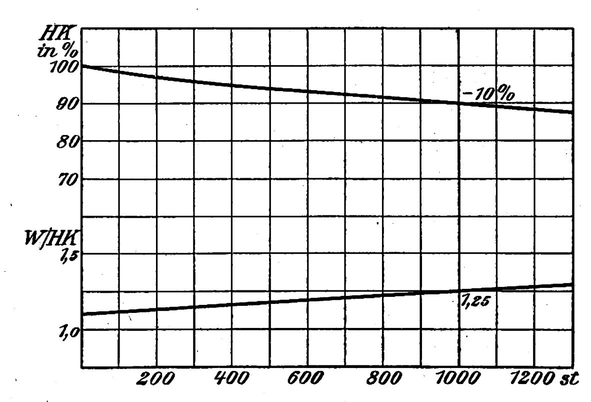


Abb. 435. Lichtstärke und spezifischer Verbrauch der Wolframlampe.

4. Vergleich der verschiedenen Glühlampen.

(703) Abhängigkeit der Lichtstärke und des spezifischen Verbrauches von der Brennzeit. Die Kurven in Abb. 434 und 435 zeigen den Verlauf für Kohlenfaden- und Wolframlampen. Die Nutzbrenndauer für den Kohlenfaden ist wesent-

lich geringer als für den Wolframfaden, während der spezifische Verbrauch und damit der Gesamtverbrauch bei gleicher Lichtstärke über dreimal so hoch liegt und im Laufe der Zeit stärker wächst.

Auch die Beziehungen zwischen Lichtstärke und Effektverbrauch, Lichtstärke und Spannung, sowie Spannung und Effektverbrauch sind untersucht worden (Monasch, Elektrische Beleuchtung 1910, II. Teil, S. 74 und 75).

(704) Prüfung der Glühlampen. Zur Prüfung einer Glühlampensorte wird man etwa 20% der Lieferung untersuchen und diese Untersuchung auf die elektrischen, photometrischen und mechanischen Eigenschaften erstrecken. Bei der vorgeschriebenen Spannung wird die Stromstärke, der Energieverbrauch und die Lichtstärke und daraus der spezifische Verbrauch bestimmt. Zur Messung der Lichtstärke wird je nach den Umständen entweder die mittlere horizontale Lichtstärke rechtwinklig zur Hauptachse der Lampe oder die sphärische Lichtstärke mittels der Ulbrichtschen Kugel gemessen. Für einen Teil der Lampen wird eine Dauerprüfung für die Lebensdauer ausgeführt.

Die Fäden der Lampen sind auf Gleichmäßigkeit in der Oberfläche und im Querschnitt zu prüfen. Eine schlechte Luftleere gibt sich bei Kohlenfadenlampen durch die Trägheit der Schwingungen zu erkennen, wenn man die Lampe erschüttert.

Die Prüfung der Luftleere geschieht mittels eines Induktoriums oder eines Wehnelt- oder Tesla-Apparates im elektrischen Felde. Eine mangelhafte Luftleere zeigt ein weißliches Aufleuchten. Anwesenheit von Stickstoff gibt sich durch rötliche Färbung zu erkennen. Mangelhaftes Einschmelzen oder minderwertige verarbeitete Stoffe erzeugen ein „Nachziehen" der Lampen.

(705) Wirtschaftlicher Betrieb. Die gesamten Kosten der Beleuchtung setzen sich aus den Kosten für die elektrische Energie, den Kosten für Lampenersatz und den Bedienungskosten zusammen. Sieht man von den letzteren zunächst ab und beträgt die Nutzbrenndauer einer Lampe t h, kostet die Lampenanschaffung a Pf., die kWh k Pf., ist p der spezifische Verbrauch in W/HK und J die Lichtstärke in HK, so betragen die Kosten einer HK-Brennstunde $\frac{p \cdot k}{1000} + \frac{a}{t \cdot J}$ Pf. und die Gesamtkosten einer (Lampen-)Brennstunde $\frac{p \cdot k \cdot J}{1000} + \frac{a}{t}$ Pf. Hieraus ergibt sich, daß bei niedrigen Herstellungskosten der elektrischen Energie, wie z. B. in Fabrikbetrieben mit eigener Zentrale, Kohlenfadenlampen mit großem spezifischen Verbrauch zu wählen sind. Bei höheren Kosten des Stromes, wie bei dem Bezug aus einem fremden Netz, ist selbst bei größerem Aufwande für Lampenanschaffung und Ersatz die Verwendung von Metallfadenlampen mit geringerem spezifischen Verbrauch günstiger.

Hieraus ergibt sich weiter, daß die Metallfadenlampen selbst bei höheren Anschaffungskosten (3—4mal so hoch) den Kohlenfadenlampen überlegen sind. Auch betreffs der Festigkeit sind die Spiraldrahtlampen durch die gute Verankerung ihres Leuchtkörpers den Kohlenfadenlampen gleichwertig, wie der Betrieb auf Schiffen und an anderen Stellen gelehrt hat. Über die Verwendung von sehr lichtstarken Metallfadenlampen mit kürzerer Brennzeit s. (718).

Bogenlampen.

1. Bogenlampen mit Lichtbogen im luftleeren Raum.

(706) Quecksilberdampflampe. Die Erregung der Strahlung in der Quecksilberdampflampe beruht auf einem gleichzeitigen Temperatur- und Lumineszenzleuchten. Der Brenner besteht aus einer Quarzröhre, da diese eine höhere Bean-

spruchung als Glas zuläßt und außerdem die reichlich vorhandenen violetten und ultravioletten Strahlen durchläßt. Die Lampe wird nur mit Gleichstrom betrieben. Als Kathode dient Quecksilber, als Anode eine Eisenelektrode. Wegen des Fehlens der roten und gelben Strahlen hat die Lampe nur beschränkte Anwendung gefunden. Das Zünden der Lampe geschieht durch Kippen auf elektromagnetischem Wege. Der beim Hinüberfließen des Quecksilbers entstehende Kurzschluß und darauf folgende Lichtbogen dient zur Ionisierung der Gasstrecke. Die nachstehende Zusammenstellung zeigt das Verhalten im Betrieb.

Tabelle 4. Quecksilberdampflampe.

Lampenart	Betriebs-Spannung V	Lichtbog.-Spannung V	A	HK	W/HK
Quarzlampe mit Klarglas-glocke	110	85	4	1200	0,37
	220	160	2,5	1500	0,37
	220	180	3,5	3000	0,26

Der Vorteil der Lampe besteht darin, daß sie an kein Regelwerk gebunden ist, also gleichmäßig strahlt, daß kein Verbrauch an Stoffen stattfindet, und daß die Bedienungskosten bis auf das Putzen der Außenglocke gering sind. Bei der Betätigung an der Lampe schütze man Augen und Haut vor dem zerstörenden Einfluß der ultravioletten Strahlen, die für chemische und medizinische Zwecke Verwendung finden.

2. Bogenlampen mit offenbrennendem Lichtbogen.

(707) Konstruktion. Die Versuche, regelwerklose Bogenlampen zu bauen, sind als mißglückt zu betrachten. Das Werk der Lampe hat erstens die Zündung, d. h. das Berühren der beiden Kohlenelektroden und ihre darauf folgende Trennung zu bewirken, zweitens den Nachschub der Elektroden während ihres Abbrennens zu unterhalten. Diese Regulierung geschieht auf elektromagnetischem Wege entweder durch einen im Hauptstrom mit den Kohlenelektroden in Reihe geschalteten Elektromagnet, der die beiden aufeinander sitzenden Kohlen voneinander abhebt, um den Lichtbogen zu bilden und zu unterhalten (Hauptschlußlampe), oder durch einen im Nebenschluß zu den Kohlen liegenden Elektromagnet, der bei der Erregung die beiden vorher voneinander getrennten Kohlen zur Berührung bringt und dann zur Bildung und Unterhaltung des Lichtbogens voneinander trennt (Nebenschlußlampe), oder durch die gemeinschaftliche Einwirkung einer Haupt- und einer Nebenschlußlampe (Differentiallampe). Während bei den beiden ersten Lampenarten meistens die Schwerkraft als Gegenkraft gegen die elektromagnetische Kraft zur Ausregelung dient, suchen sich in der Differentiallampe die Kräfte der beiden Spulen das Gleichgewicht zu halten.

(708) Schaltung. Hauptschlußlampen können nur einzeln brennen, Nebenschlußlampen brennen zu zweien in Reihe, Differentiallampen können bei genügender Spannung in beliebiger Zahl in Reihe brennen. In Wechselstromanlagen kann man Bogenlampen einzeln brennen bei Anwendung eines Transformators. Den Vorschaltwiderstand für Bogenlampen in Gleichstromanlagen ersetzt man in Wechselstromanlagen durch eine Drosselspule.

(709) Elektroden. Als Elektroden finden in Deutschland Kohlenstifte und zwar ohne Zusätze als Reinkohlen, mit Zusätzen als Effektkohlen Anwendung. Die

Kohlenmasse wird aus Ruß durch Verbrennung von Petroleumrückständen gewonnen. Bei Gleichstrom wird als negative Elektrode eine Vollkohle als Homogenkohle, als positive Elektrode eine stärkere Dochtkohle verwendet, deren innerer Kern eine weichere Dochtmasse enthält. Bei Wechselstrom werden zwei gleichstarke Dochtkohlen verwendet.

Effektkohlen sind Dochtkohlen mit Leuchtzusätzen aus den Fluoriden von Kalzium, Strontium, Barium usw. Der Docht bildet oft die Hauptmasse des ganzen Kohlenstiftes, so daß die Reinkohle nur noch den äußeren Mantel darstellt. Wegen der geringeren Leitfähigkeit der Effektkohlen wird in diese auch ein Draht aus Kupfer oder Zink eingezogen.

(710) Bogenlampenarten. Man unterscheidet Bogenlampen mit offen brennendem und mit geschlossen, d. h. unter vermindertem Luftzutritt brennenden Lichtbogen, außerdem Lampen mit über- oder nebeneinanderstehenden Kohlen und erhält so nach der Zusammenstellung des VDE (ETZ 1909, S. 458):

Offene / Geschlossene } Bogenlampe mit { über- / neben- } einanderstehenden { Rein- / Effekt- } Kohlen

für { Gleichstrom. / Wechselstrom.

In der Regulierung ist die Differentiallampe der Nebenschlußlampe überlegen (G ö r g e s, ETZ 1899, S. 444). Die Lichtschwankungen sind bei Lampen mit nebeneinanderstehenden Kohlen weniger heftig als bei solchen mit übereinanderstehenden Kohlen.

(711) Ungleichmäßige Lichtausstrahlung. Die Lichtausstrahlung geht von dem Ende der einen Kohle, der Luftstrecke zwischen den beiden Kohlen und dem Ende der anderen Kohle aus. Bei Gleichstrom erreicht das in Kraterform ausbrennende Ende der positiven Kohlenelektrode die höchste Temperatur von fast 4000° und ist dementsprechend überwiegend an der Lichterzeugung beteiligt, während sich dieselbe bei Wechselstrom auf beide kraterförmig ausbrennenden Enden gleichmäßig verteilt. Die Intensität unter den verschiedenen Winkeln ist verschieden, erreicht meistens in der wagrechten und senkrechten Richtung einen geringsten und zwischen 30—50° gegen die senkrechte Richtung einen höchsten Wert, der bei einer Wechselstromlampe wegen des gleichen kraterförmigen Abbrandes beider Kohlen unterhalb und oberhalb der wagrechten Richtung auftritt. Zur besseren Ausnutzung der nach oben ausgestrahlten Lichtmenge für die Beleuchtung nach unten werden deshalb die Wechselstromlampen mit einem Reflektor versehen, während der auch in den Gleichstromlampen angebrachte Sparer ein langsameres Abbrennen der Kohlen bewirkt.

(712) Schutzglocken, Laternen. Durch die Umhüllungen in Form von Glocken oder Laternen wird der sehr empfindliche Lichtbogen gegen Wind geschützt, die blendende Wirkung der Lichtquelle gemildert und die Lichtausstrahlung teils in richtige Bahnen gelenkt, teils zur Vermeidung scharfer Schatten zerstreut. Durch prismenartig wirkende Glocken (Holophanglocken, Diopterglocken) oder Reflektoren (G r a b o w s k i, ETZ 1910, S. 11) kann man die Verteilung des Lichtes günstig beeinflussen; aber solche Einrichtungen müssen sehr sauber gehalten werden, um ihre Wirkung aufrecht zu erhalten.

(713) Spannung und Leuchtkraft der Bogenlampe. Die Spannung an den Lampenklemmen hängt von der Stromstärke, der Lichtbogenlänge und der Art und Abmessung der Kohlenstifte ab. Die nachstehenden Tabellen 5 a bis f zeigen Werte, die sich herausgebildet haben für die Lampen ohne Glocken, bei Dauerbrandlampen ohne Außenglocken:

Tabelle 5a. Offene Bogenlampe mit Reinkohlen, Gleichstrom.

Gültig für Nebenschluß- und Differentiallampen. 2 Lampen hintereinander bei 110 V; 4 Lampen hintereinander bei 220 V.

Stromstärke A	6	8	10	12	15
Lichtbogenspannung V	40	40	41	42	43
Dochtkohle, Durchm. mm	14	16	18	20	21
Homogenkohle, Durchm. mm	9	10	12	13	14
Lichtstärke $HK_{\smile}$	400	650	850	1100	1450
Verbrauch der Lampe bei 55 V W	330	440	550	660	825
Spezif. Verbrauch W/$HK_{\smile}$	0,83	0,68	0,65	0,60	0,57

Länge jeder Kohle mm: 200 290 325
Brenndauer in Stunden: 10—12 16—18 18—23

Tabelle 5b. Offene Bogenlampe mit Reinkohlen, Gleichstrom.

Gültig für Differentiallampen. 3 Lampen hintereinander bei 110 V; 6 Lampen hintereinander bei 220 V.

Stromstärke A	6	8	10	12
Lichtbogenspannung V	35	35	35	35
Dochtkohle, Durchm. mm	13	14	16	18
Homogenkohle, Durchm. mm	8	9	10	11
Lichtstärke $HK_{\smile}$	330	530	780	1020
Verbrauch der Lampe bei 37 V W	240	320	400	480
Spez. Verbrauch W/$HK_{\smile}$	0,73	0,60	0,51	0,47

Länge jeder Kohle mm: 200 290 325
Brenndauer in Stunden: 10—12 16—18 18—23

Tabelle 5c Offene Bogenlampe mit Reinkohlen, Wechselstrom.

Gültig für Nebenschluß- und Differentiallampen. Mit Lichtreflektor über dem Lichtbogen. 3 Lampen hintereinander bei 110 V.

Stromstärke A	8	10	12	15	20
Lichtbogenspannung V	28 – 30	29 – 31	29 – 31	29 – 31	31 – 33
Dochtkohlen, Durchm. mm	11	12	13	14	16
Lichtstärke $HK_{\smile}$	200	300	400	540	720
$\cos \varphi$	0,96	0,95	0,95	0,95	0,98
Verbrauch der Lampe bei 37 V W	283	350	417	521	716
Spez. Verbrauch W/$HK_{\smile}$	1,42	1,17	1,04	0,97	1,00

Länge jeder Kohle mm: 200 290 325
Brenndauer in Stunden: 8—9 12—14 14—16

Tabelle 5d. Geschlossene Bogenlampe mit Reinkohlen, Gleichstrom.

Gültig für Hauptstrom- und Differentiallampe. 1 Haupstromlampe bei 110 V, 2 Differentiallampen hintereinander bei 220 V.

Stromstärke A	4	5	6
Lichtbogenspannung V	75	75	75
Homogenkohlen, Durchm. mm	10	13	13
Lichtstärke $HK_{\smile}$	350	530	660
Verbrauch der Lampe bei 110 V W	440	550	660
Spez. Verbrauch W/$HK_{\smile}$	1,26	1,04	1,00

Länge jeder oberen Kohle 300 mm, jeder unteren Kohle 150 mm.
Brenndauer (einzelne ununterbrochene Brennzeiten etwa 5 h):

Ampere	4	5	6
Stunden	90—100	130—150	110—120.

Tabelle 5e. Offene Bogenlampe mit Effektkohlen, Gleichstrom.

Gültig für Differentiallampen, Kohlen nebeneinanderstehend. 2 Lampen hintereinander bei 110 V, 4 Lampen hintereinander bei 220 V.

Stromstärke A	8	10	12
Lichtbogenspannung V	47	48	49
Positive Dochtkohle, Durchm. mm	9	10	11
Negative Dochtkohle, Durchm. mm	8	9	10
Lichtstärke HK⌣	2100	3000	3900
Verbrauch der Lampe bei 55 V W	440	550	660
Spez. Verbrauch W/HK⌣	0,21	0,18	0,17

Länge jeder Kohle mm:	400	600
Brenndauer in Stunden:	10—11	16—18

Tabelle 5f. Offene Bogenlampe mit Effektkohlen, Wechselstrom.

Gültig für Differentiallampen, Kohlen nebeneinanderstehend. 2 Lampen hintereinander bei 110 V.

Stromstärke A	8	10	12
Lichtbogenspannung V	47	48	49
Dochtkohlen, Durchm. mm	8	9	9
Lichtstärke HK⌣	1250	1900	2550
cos φ	0,93	0,88	0,88
Verbrauch der Lampe bei 55 V W	407	482	577
Spez. Verbrauch W/HK⌣	0,33	0,25	0,23

Länge jeder Kohle mm:	400	600
Brenndauer in Stunden:	10—11	16—18

Während die Hauptschlußbogenlampe nur einzeln gebrannt werden kann, läßt sich die Nebenschlußbogenlampe bei 110 V zu 2 und bei 220 V zu 4 Lampen in Reihe brennen. Dagegen kann man Differentialbogenlampen bereits bei 110 V zu 3 Lampen in Reihe brennen, nutzt also die verfügbare Spannung besser aus und erreicht durch die Verteilung der Lichterzeugung auf 3 Stellen bei derselben Energieaufwendung eine wesentlich stärkere und gleichmäßigere Beleuchtung.

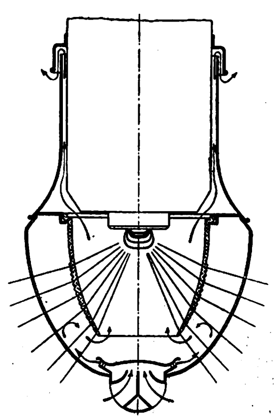


Abb. 436. Effektkohlenbogenlampe mit Doppelglocke.

Bei den mit Effektkohlen brennenden Bogenlampen muß für eine gute Führung und Entlüftung für die Verbrennungsgase Sorge getragen werden, damit die Gase an sich und die mitgeführten sehr feinen Staubteilchen aus den Metalloxyden nicht auf das Regelwerk der Lampe und die in der Umgebung arbeitenden Menschen schädlich einwirken. Die in Abb. 436 dargestellte

Flammenbogenlampe mit nebeneinanderstehenden Kohlen zeigt zur Vermeidung des Beschlages durch die Aschenteilchen eine Doppelglocke, um die nötige Zugwirkung hervorzubringen neben einer gleichzeitigen günstigen Ausbreitung der Strahlung (Heyck, ETZ 1909, S. 1055).

(714) Geschlossene Bogenlampen mit Reinkohlen. Die übereinanderstehenden Kohlen brennen flach ab mit verhältnismäßig langem, unruhigen Lichtbogen, der reich an blauen und violetten Strahlen ist. Deshalb werden die Lampen auch als Kopierlampen vielfach verwendet. An denjenigen Stellen, an denen weniger auf ruhiges und gleichmäßiges Licht als vielmehr auf Einfachheit und Ersparnis in der Bedienung Rücksicht zu nehmen ist, werden Dauerbrandlampen Verwendung finden können. Je öfter die Lampe gelöscht wird, um so kürzer wird die Gesamtbrennzeit ihrer Kohlenstifte sein, da in die kleine, den Lichtbogen abschließende Glasglocke bei jedem Löschen der Lampe von neuem Luft bzw. Sauerstoff eindringt und die Verbrennung in der folgenden Brennzeit beschleunigt.

(715) Geschlossene Bogenlampen mit Effektkohlen. Bei diesen Lampen ist die Hauptschwierigkeit, eine Beschlagfreiheit der Glocke bzw. Doppelglocke von den Verbrennungserzeugnissen zu erhalten, um die Lichtausstrahlung nicht zu schwächen. Dies ist dadurch möglich, daß man die mit Ascheteilchen geschwängerten Verbrennungsgase durch einen an der Glaswand entlang streichenden reinen Gasstrom ableitet und die Aschenteilchen an Stellen zum Niederschlag bringt, die für die Lichtentwicklung von keiner Bedeutung sind.

(716) Vorschaltwiderstände und Drosselspulen. Für Bogenlampen in Gleichstromanlagen werden zur Abdrosselung der Spannung einstellbare Drahtwiderstände auf feuerfester Unterlage benutzt. In Wechselstromanlagen verwendet man Spulen von hoher Induktivität mit einstellbarem Luftspalt, um möglichst wirtschaftlich zu arbeiten, sofern man nicht einen Transformatorenbetrieb vorzieht.

(717) Lichtverlust durch Glasglocken. Klarglasglocken werden wegen der schlechten Wirkung durch die Schlieren im Glas wenig verwendet. Opalüberfangglas wird vielfach verwendet. Die nachstehende Zusammenstellung gibt Monasch (Elektrische Beleuchtung 1910, S. 171):

Tabelle 6. Lichtverlust durch Glasglocken.

Gasglocke	Hemisphärische Werte (Straßenbeleuchtung)			Sphärische Werte (Beleuchtung bedeckter Räume)		
	Lichtstärke	Verlust		Lichtstärke	Verlust	
	$\mathrm{HK}_{\triangledown}$	in $\mathrm{HK}_{\triangledown}$	in %	HK_0	in HK_0	in %
Ohne Glasglocke .	595	0	0	358	0	0
Klarglas	550	45	7,6	325	33	9,2
Opalüberfangglas .	430	165	27,7	297	61	17,1
Alabasterglas . .	385	210	35,2	237	121	33,8

Bei den gegenwärtig im Handel befindlichen Glasglocken liegen die hemisphärischen Verluste bei Glocken aus

Klarglas . . . . zwischen 5 und 15% meist 10%
Opalüberfangglas . . . . „ 10 „ 35% „ 25%
Alabasterglas. . . . . . „ 20 „ 50% „ 35%

(718) Bogenlampen und lichtstarke Metallfadenlampen. Gegenüber von Bogenlampen, insbesondere für geringere Lichtstärken, erweisen sich vielfach, so insbesondere für die Beleuchtung von Bahnhöfen, Straßen, Fabriken, Sälen u. dgl., lichtstarke Metallfadenlampen, die bis zu Lichtstärken von 1000 HK hergestellt werden (701), zweckmäßiger. Die Metallfadenlampe bedarf so gut wie keiner Bedienung, da bei ihr keine Reinigung und kein Ersatz, wie der für Kohlenstifte bei den Bogenlampen, nötig ist. Ferner können Metallfadenlampen bei Span-

nungen bis 250 V einzeln und unabhängig gebrannt und ausgeschaltet werden. Auch in bezug auf die Betriebskosten sind Metallfadenlampen unter Umständen wirtschaftlicher, da durch Verwendung mehrerer solcher Lampen geringerer Lichtstärke an Stelle einer Bogenlampe der entsprechend höheren Lichtstärke eine günstigere Lichtverteilung geschaffen werden kann, die noch dadurch sich verbessern läßt, daß man diese Metallfadenlampen niedriger hängen kann, als es bei Bogenlampen der Fall sein müßte (Remané, ETZ 1908, S. 804).

Vergleich der gebräuchlichen Lichtquellen.

(719) Vergleich der Lichtquellen. Ein Vergleich von Lichtquellen kann sich zunächst auf die Umsetzung der zugeführten Energie in sichtbare Strahlung beziehen. Dazu ist die Bestimmung des gesamten Lichtstromes, z. B. durch Verwendung der Ulbrichtschen Kugel, nötig. Auch sollte man Lichtquellen von möglichst gleicher Lichtstärke in Vergleich zu setzen suchen. Die Umrechnung auf

Tabelle 7. Vergleich von Lichtquellen.

Lichtart	Lichtstärke HK	Stündl. Verbrauch	Materialpreis Pf.	Kosten einer HKh Pf.
Petroleumlampe, 14 liniger Brenner	wagerecht 15	44 g	1000 g = 25	0,073
Spiritusglühlicht	65	129 g	1000 g = 29	0,058
„ (hängend)	20	42 g	1000 g = 29	0,061
Gasglühlicht ohne Glocke	74	112 l	1000 l = 16	0,024
„ mit Klarglasglocke	67	112 l	1000 l = 16	0,027
„ (hängend)	70	70 l	1000 l = 16	0,016
„ Preßgas (hängend)	1850	761 l	1000 l = 16	0,007
Kohlenfaden-Glühlampe	16	50 Wst	1000 Wst = 50	0,156
Nernst-Lampe, Osmium-Lampe	32	50 „	1000 „ = 50	0,078
Tantal-Lampe	32	50 „	1000 „ = 50	0,078
Wolfram-Lampe	32	35 „	1000 „ = 50	0,055
„ (Spiraldraht)	2000	1000 „	1000 „ = 50	0,025
Quarzlampe	hemisphärisch 1500	550 „	1000 „ = 50	0,018
10 A-Reinkohlen-Bogenlicht für Wechselstrom mit Opalglasglocke	hemisphärisch 225	350 „	1000 „ = 50	0,078
10 A-Reinkohlen-Bogenlicht für Wechselstrom mit Klarglasglocke	270	350 „	1000 „ = 50	0,066
10 A-Reinkohlen-Bogenlicht für Gleichstrom mit Opalglasglocke	625	550 „	1000 „ = 50	0,044
10 A-Reinkohlen-Bogenlicht für Gleichstrom mit Klarglasglocke	770	550 „	1000 „ = 50	0,036
10 A-Effektkohlen-Bogenlicht für Gleichstrom mit Opalglasglocke	2250	550 „	1000 „ = 50	0,012
10 A-Effektkohlen-Bogenlicht für Gleichstrom mit Klarglasglocke	2700	550 „	1000 „ = 50	0,010
12 A-Effektkohlen-Dauerbrand-Bogenlicht für Wechselstrom mit Klarglasglocke	2200	600 „	1000 „ = 50	0,014

den spezifischen Verbrauch allein, bezogen z. B. auf die Anzahl der aufgewendeten Watt oder Kalorien zur Erzeugung 1 HK_o gibt im allgemeinen nur ein Bild über den wissenschaftlichen Stand. Da es sich im alltäglichen Leben um die Ausnutzung der erzeugten Strahlung für die Beleuchtung handelt, ist in jedem einzelnen Fall der Zweck der Beleuchtung zu berücksichtigen. Dementsprechend ist die Bestimmung der Lichtstärke J_o, $J_{\smile}$ oder $J_{\frown}$ notwendig. In vielen Fällen wird man auch die einzelne Lichtquelle als ein in sich gegebenes, unveränderliches Ganzes zu betrachten haben und ist dann gezwungen, Lichtquellen ungleicher Lichtstärke gegeneinander abzuwägen.

Zu diesen nicht ganz einfachen Erwägungen kommt dann noch die Frage der Wirtschaftlichkeit. Für die Lösung dieser Aufgabe ist nicht allein der Preis für eine Hefnerkerzenstunde (sphärisch, hemisphärisch unten, hemisphärisch oben), sondern auch für eine Lampenstunde und schließlich der Preis der Beleuchtung für 1 m^2 Fläche oder auch für 1 m^3 des Raumes festzustellen.

Hierzu kommen dann weiter die Kosten der Unterhaltung und Bedienung, die z. B. bei einem Vergleich der Beleuchtung durch lichtstarke Metallfadenlampen mit der durch Bogenlampen zu errechnen sind. Jedenfalls ist die ganze Frage von Fall zu Fall zu entscheiden, so daß die in der Tabelle 7 angegebenen Zahlen zunächst nur einen teilweisen Anhalt für weitere Benutzung geben können.

Neuere Literatur über elektrische Beleuchtung: Heinke und Ebert, Handbuch der Elektrotechnik. 1904, Bd. I, 2. — J. Zeidler, Die elektrischen Bogenlampen. 1905. — Wedding, Über den Wirkungsgrad und die praktische Bedeutung der gebräuchlichsten Lichtquellen. 1905. — Biegon von Czudnochowski, Das elektrische Bogenlicht. 1906. — Herzog und Feldmann, Handbuch der elektrischen Beleuchtung. 1907. — Vogel, Die Metalldampflampen mit besonderer Berücksichtigung der Quecksilberdampflampen. 1907. — Bloch, Grundzüge der Beleuchtungstechnik. 1907. — Weber, Die Kohlenglühfäden für elektrische Glühlampen. 1907. — Weber, Die elektrischen Kohlenglühfadenlampen, ihre Herstellung und Prüfung. 1908. — Biscan, Elektrische Lichteffekte. 1909. — B. Monasch, Elektrische Beleuchtung. 1910. — Weber, Die elektrischen Metallfadenglühlampen. 1914. — J. C. Pole, Die Quarzlampe. 1914. — N. L. Müller, Die Fabrikation und Eigenschaften der Metalldrahtlampen. 1914. — O. Lummer, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik. 1918. — Halbertsma, Fabrikbeleuchtung. 1918. — Zeitschrift für Beleuchtungswesen, Heizungs- u. Lüftungstechnik 1894—1919.

Verteilung der Beleuchtung.

(720) Beurteilung der Beleuchtung. Zur Beurteilung der Beleuchtung einer Fläche dient in erster Linie die Stärke der Beleuchtung. Liegt die beleuchtete Fläche wagrecht, und wird die Beleuchtung auch in dieser Ebene gemessen, so bezeichnet man diese als Horizontalbeleuchtung. Da die meisten Arbeiten auf wagrechten oder angenähert wagrechten Flächen verrichtet werden (Tische, Pulte, Werkbänke), ist die horizontale Beleuchtung von überwiegender Bedeutung für die Beurteilung der Beleuchtung.

Verläuft die beleuchtete Fläche senkrecht (z. B. Wandtafel, Gemälde), so wird die Beleuchtungsstärke, welche man auf dieser Ebene mißt, als Vertikalbeleuchtung bezeichnet.

Ist an einer Stelle des Raumes nur Horizontalbeleuchtung vorhanden und keine Vertikalbeleuchtung als Folge eines ausschließlich senkrechten Auftreffens des Lichtes, so ist diese Beleuchtung für räumliche Gebilde ungeeignet (Beispiel: Maschinenmontage).

Während die Normalien des VDE nur die Horizontalbeleuchtung berücksichtigen, fordern die Vorschriften der Amerikanischen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft für Fabrikbeleuchtung neben der Horizontalbeleuchtung eine Vertikalbeleuchtung in Höhe des halben Betrages (Halbertsma, Fabrikbeleuchtung. München 1918, S. 170).

Für die Straßenbeleuchtung war die Frage: Horizontalbeleuchtung oder Vertikalbeleuchtung lange Zeit umstritten. Sie ist jetzt durch die Entwicklung

der Gaslichtquellen und durch Millars Untersuchungen über den Silhouetteeffekt bei der Straßenbeleuchtung zugunsten der Horizontalbeleuchtung entschieden.

Als Nachteil der Verwendung der Vertikalbeleuchtung sei noch erwähnt, daß bei ihr die Richtung der Meßebene nicht feststeht, bzw. daß sie als Mittel aus vier um 90° versetzten Ebenen genommen werden muß, während die Horizontalbeleuchtung eindeutig bestimmt ist.

Unter Normalbeleuchtung in einem Punkt versteht man die Beleuchtung in einer durch diesen Punkt verlaufenden Ebene senkrecht zur Richtung des einfallenden Lichtes. Sie ist daher an das Vorhandensein von Licht geknüpft, das nur aus einer Richtung kommt, bzw. an die Beleuchtung durch nur eine Lichtquelle. Dieser Fall kommt praktisch wenig vor.

Sowohl bei der Straßenbeleuchtung als bei der Innenbeleuchtung (auch bei Tageslicht) weist die Beleuchtungsstärke an verschiedenen Stellen sehr verschiedene Werte auf. Falls man den Verlauf der Beleuchtung nicht durch Zahlentafeln oder Beleuchtungskurven im einzelnen kennzeichnen will, genügt die mittlere Horizontalbeleuchtung, d. i. der Mittelwert der Beleuchtung an einer großen Anzahl gleichmäßig verteilter Punkte der Fläche. Die mittlere Horizontalbeleuchtung hat deshalb besondere Bedeutung gewonnen, weil sie, unter Umgehung der Beleuchtungsberechnung für die einzelnen Punkte, nach verschiedenen einfachen Methoden (726, 727, 728) unmittelbar berechnet werden kann.

Die Ungleichmäßigkeit der Beleuchtung wird durch das Verhältnis der maximalen zur minimalen Beleuchtung gekennzeichnet. Beleuchtungswerte, die durch zufällige Umstände besonders hoch (Scheinwerfereffekt unter Reflektoren, ETZ 1917, S. 496) oder besonders niedrig sind (Schlagschatten von Säulen u. dgl.) dürfen nicht als Maximal- bzw. Minimalwert der Beleuchtung eingeführt werden, da man hierdurch unter Umständen einen viel zu hohen Wert der Ungleichmäßigkeit erhält.

Richtung des auftreffenden Lichtes, Anzahl und Abmessungen der Lichtquellen beeinflussen die Schattenbildung, und üben damit einen wesentlichen Einfluß auf die Güte der Beleuchtung aus. Schatten können sowohl durch ihre Schärfe (rascher Übergang am Schattenrand von hoher zu niedriger Beleuchtung) als durch ihre Tiefe (starker Kontrast zur beleuchteten Umgebung) das deutliche Sehen beeinträchtigen. Verlaufende Schatten entstehen bei großen Abmessungen der Lichtquellen (indirekte und halbindirekte Beleuchtung). Tiefe Schatten werden aufgehellt durch Anbringung mehrerer Lichtquellen oder durch die Reflexion des Lichtes an Decken und Wänden.

Die Richtung des auftreffenden Lichtes ist ferner so zu wählen, daß bei spiegelnden Arbeitsstücken (z. B. Weißblech, Meßinstrumenten) kein direktes Licht in das Auge reflektiert wird. Störende Spiegelung der Lichtquelle wird dadurch vermieden.

Die Farbe des Kunstlichtes weicht durchweg von derjenigen des Tageslichtes ab. Bei Lichtquellen mit ausgesprochener Farbe (Quecksilberdampflampe, Neonröhre) kann dieser Unterschied so beträchtlich sein, daß sie für gewöhnliche Beleuchtungszwecke nicht verwendbar sind. Bei Bogenlicht, elektrischem Glühlicht und Gasglühlicht spielt der Unterschied praktisch nur dann eine Rolle, wenn Farben genau unterschieden werden müssen (Druckereien, Färbereien u. dgl.). Künstliches Tageslicht kann man in solchen Fällen herstellen durch Verwendung von Blaufiltern, die einen Teil der langwelligen Lichtstrahlen absorbieren. Bei Verwendung von Gasfüllungslampen beträgt nach Luckiesh der Lichtverlust hierbei mindestens 67 %, um künstliches Sonnenlicht, und mindestens 81 %, um künstliches Nordlicht zu erzeugen.

(721) Die erforderliche Beleuchtungsstärke. Die Stärke der Beleuchtung beeinflußt die Sehschärfe des Auges und damit die Leistung des Menschen bei fast jeder Art der Arbeit. Wird die Leistung beim Lesen z. B. durch die in einer Zeiteinheit gelesenen Worte ausgedrückt, so wird diese Abhängigkeit durch Kurven

dargestellt, wie sie in Abb. 437 wiedergegeben sind. Danach brauchen schwache Augen (*b*) eine stärkere Beleuchtung als normale (*a*). Ein allgemeingültiger Wert der erforderlichen Beleuchtung läßt sich aber auch aus dem Grunde nicht angeben, weil die verschiedenen Arbeiten sehr verschiedene Anforderungen an die Sehschärfe des Auges stellen. Feine Arbeiten erfordern starke Beleuchtung, bei groben Arbeiten genügt eine schwächere.

Es empfiehlt sich vorzusehen:

100—150 Lux für Arbeiten, welche die höchsten Anforderungen an die Sehschärfe des Auges stellen (Uhrmacher-, Gold- und Silberarbeiten, Gravieren, Schleifen von Edelsteinen, lithographische Arbeiten, Anfertigung von Holzschnitten, feine Zeichenarbeiten, feine Näh- und Stickarbeiten).

70—100 Lux für Feinarbeiten, die hohe Anforderungen an die Sehschärfe des Auges stellen (Weben feiner und dunkler Stoffe, Nadelfabrikation, Setzerei, Feinmechanik, Zeichnen).

50—60 Lux für Arbeiten, bei denen es genügt, daß alle Einzelheiten erkannt werden (Werkzeugmaschinen, Schlosserei und Montage, Ankerwickeln, Drahtziehen, Stanzen, Bureau- und Schreibarbeiten, Druckereien, Maschinenhäuser, Schalttafeln, Webereien, Modellschreinereien).

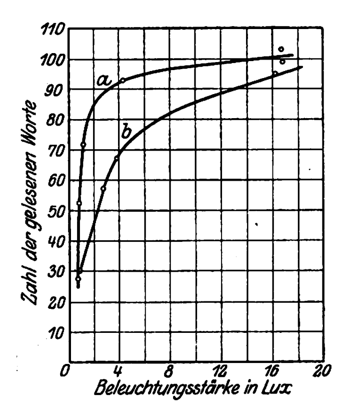


Abb. 437. Leistung der Augen bei verschiedenen Beleuchtungsstärken.

20—40 Lux für Grobarbeiten (Schmiede, Schreinerei, Klempnerei, Gießerei, Walzwerke).

10 Lux für Räume, in denen die Beleuchtung nur gelegentlich oder nicht zum Arbeiten gebraucht wird (Lagerräume, Speicher, Korridore).

Diese Werte gelten für Allgemeinbeleuchtung. Werden sie nur der Beleuchtung des eigentlichen Arbeitsplatzes zugrunde gelegt, so ist darauf zu achten, daß nicht nur der Höchstwert, sondern der Mittelwert der Beleuchtung auf dem ganzen Arbeitsplatz den obengenannten Zahlen entspricht. Daneben muß dann noch um den Verkehr und Materialtransport zwischen den Arbeitsplätzen gefahrlos zu ermöglichen eine Allgemeinbeleuchtung vorgesehen werden, die 25 % der Beleuchtung auf den Arbeitsplätzen betragen, keinesfalls aber 20 Lux unterschreiten sollte.

Für die Straßenbeleuchtung genügen weit niedrigere Beleuchtungsstärken. Bloch empfiehlt als mittlere Beleuchtung für Hauptstraßen mit starkem Verkehr 3—6 Lux, Nebenstraßen mit starkem Verkehr 1,5—3 Lux, Nebenstraßen mit schwachem Verkehr 0,5—1 Lux.

(722) Beleuchtungssysteme. Direkt nennt man eine Beleuchtungsanlage, wenn der Lichtstrom der Lampen ausschließlich oder überwiegend in den unteren Halbraum geworfen wird (Abb. 438 a).

Indirekt nennt man eine Beleuchtungsanlage, wenn der ganze Lichtstrom in den oberen Halbraum geworfen wird, so daß er die Arbeitsplätze erst nach der (diffusen) Reflexion an Decke und Wände erreicht (Abb. 438 b).

Halbindirekt nennt man die Beleuchtungsanlage, bei welcher der Lichtstrom vorwiegend (also mindestens zur Hälfte) in den oberen Halbraum ausgestrahlt wird, von wo er wie bei der indirekten Beleuchtung zurückgeworfen wird. Neben diesem indirekten Teil des Lichtstroms erreicht der direkte Teil unmittelbar die Arbeitsplätze, in der Regel nachdem er durch eine lichtstreuende Schale hindurchgegangen ist (Abb. 438 c).

Das Anwendungsgebiet der direkten Beleuchtung ist neben der Straßen-(Außen-) und Arbeitsplatz-(Innen-)Beleuchtung, die Beleuchtung von Hallen mit Sheddächern und ähnlichen Oberlichtern, sowie von solchen Bauten (Gießereien, Schmieden, Bahnhofshallen), in denen mit Rauch und Schmutz zu rechnen ist, so daß Decke und Wände kein Licht reflektieren.

Indirekte Beleuchtung ist wirtschaftlich nur durchführbar in Räumen mit weißer Decke und hellen Wänden.

Bei halbindirekter Beleuchtung kann man hierauf verzichten, wenn an Stelle der weißen Decke ein größerer Reflektor tritt.

Die Wahl zwischen den verschiedenen Beleuchtungssystemen wird auch dadurch beeinflußt, daß kräftige oder schwache Schatten bei der Arbeit notwendig sind. Im ersten Falle verwendet man direkte Beleuchtung oder halbindirekte Beleuchtung mit von der Decke getrenntem Reflektor, im zweiten Falle die normale halbindirekte oder die ganz indirekte Beleuchtung. Bei der letztgenannten hängt der Charakter der Schatten davon ab, ob nur Teile der Decke, oder die ganze Decke, oder die Decke und der obere Teil der Wände beleuchtet sind.

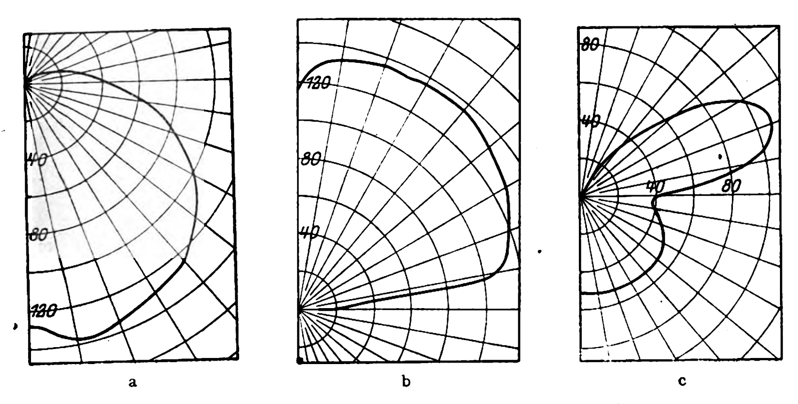


Abb. 438 a, b, c. Direkte, halbindirekte und indirekte Beleuchtung.

(723) Reflektoren und Glocken. Ein Reflektor fängt einen Teil des von der Lichtquelle ausgehenden Lichtstroms auf und wirft diesen Lichtstrom nach einer Seite des Raumes, gewöhnlich nach unten. Der übrige Teil des Lichtstroms fällt unmittelbar durch die Reflektoröffnung nach unten, seine Verteilung wird durch den Reflektor nicht beeinflußt. Ein Reflektor erfüllt daher seine Aufgabe im allgemeinen um so besser, je mehr er die Lichtquelle umfaßt, d. h. je größer der von ihm aufgefangene und demnach auch der reflektierte Lichtstrom ist. Reflektoren, welche die Lichtquelle nur mit einem kleinen Winkel umfassen, sind wirkungslos.

Die Verteilung des reflektierten Lichtes hängt wesentlich davon ab, ob der Reflektor spiegelnd oder diffus reflektiert. Spiegelnde Reflexion zeigen polierte Metalle, versilbertes Glas, sowie Glas, welches mit totalreflektierenden Prismen versehen ist (Holophanglas). Hierbei ist der Ausfallswinkel des reflektierten Stahles gleich dem Einfallswinkel des auftreffenden Strahles. Bei der diffusen Reflexion (Milchglas, Emaille) wird das Licht dagegen nach allen Richtungen reflektiert. Bei vollkommen diffuser Reflexion gilt das Gesetz von Lambert (274 F).

Bei spiegelnden Reflektoren ist die Form des Reflektors (neben der Stellung und der Größe der Lichtquelle) für die Lichtverteilung maßgebend. Bei diffuser Reflexion ist die Lichtverteilung nahezu unabhängig von der Form des Reflektors.

Glocken aus lichtstreuenden Gläsern (Mattglas, Opalüberfangglas) üben nicht wie die Reflektoren eine richtende, sondern eher eine ausgleichende Wirkung auf die Verteilung des Lichtstroms aus. Ihre Bedeutung liegt darin, daß sie (bei vollkommener Streuung, also z. B. nicht bei Mattglas) die ursprüngliche Lichtquelle dem Auge verbergen und ihrerseits als sekundäre Lichtquelle eine soviel größere Ausdehnung besitzen, daß die Flächenhelle (HK/cm²) auf einen Wert sinkt, bei dem das Auge nicht mehr geblendet wird. Sie sind daher bei Bogenlampen und bei Gasfüllungslampen (800—1300 HK/cm²) unentbehrlich, falls man nicht die indirekte Beleuchtung verwendet, die ebenfalls vollen Schutz gegen Blendung gewährt.

(724) Punktweise Berechnung der Beleuchtung. Befindet sich eine Lichtquelle L in der Entfernung r von P, so ist die Beleuchtung auf einer Ebene die durch P senkrecht zur Richtung des Lichtes $L\,P$ verläuft

$$E = \frac{J}{r^2}.$$

In der horizontalen Ebene $M\,P$ ist die Beleuchtung in P dagegen

$$E = \frac{J}{r^2} \cdot \cos\alpha.$$

Bezeichnet man die Höhe von L über $M\,P$ mit h und die Entfernung $M\,P$ mit a, so ist

$$E = \frac{J}{h^2 + a^2} \cdot \cos\alpha = \frac{J \cdot h \cdot}{(h^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{J}{h^2} \cos^3\alpha.$$

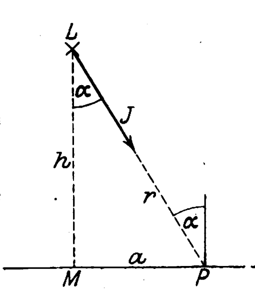


Abb. 439. Berechnung der Beleuchtung in einzelnen Punkten.

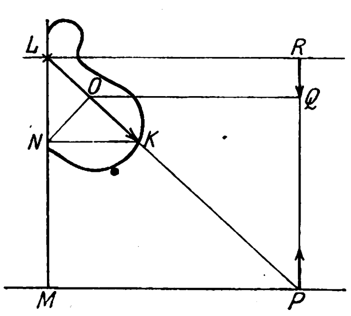


Abb. 440. Graphische Ermittlung der Beleuchtung aus der Lichtverteilungskurve.

Werte für $\cos^3\alpha$.

α	$\cos^3\alpha$	α	$\cos^3\alpha$	α	$\cos^3\alpha$	α	$\cos^3\alpha$	α	$\cos^3\alpha$	α	$\cos^3\alpha$
5°	0,989	20°	0,830	35°	0,550	50°	0,266	65°	0,0755	80°	0,00523
10	0,955	25	0,744	40	0,449	55	0,189	70	0,0400	85	0,00066
15	0,904	30	0,650	45	0,354	60	0,125	75	0,0173		

Bei der Berechnung der Beleuchtung in einer Reihe von Punkten ist zu beachten, daß die Lichtstärke J von Punkt zu Punkt verschieden ist, je nach dem Ausstrahlungswinkel α (Abb. 439), und daß die jeweilige Größe von J der Lichtverteilungskurve (Abb. 438) entnommen werden muß.

Die Beleuchtung kann auch auf graphischem Wege aus der Lichtverteilungskurve ermittelt werden, insbesondere lassen sich Beleuchtungskurven bequem auf diese Weise gewinnen (Abb. 440). Die der Lichtverteilungskurve entnommene

Strecke $L K$ (Lichtstärke J) projiziert man auf die Senkrechte $L M$. Diese Strecke $L N$ wird wieder auf $L K$ projiziert und die so erhaltene Strecke $L O$ auf die in P errichtete Senkrechte. $R Q$ ist dann die gesuchte Beleuchtung in P. Wenn bei der Lichtstärke 1 cm $= n$ HK, so ist für die Beleuchtung 1 cm $= \frac{n}{h^2}$ Lux, wenn h die Lichtpunkthöhe in m ist.

Die punktweise Beleuchtungsrechnung ist umständlich und zeitraubend, besonders wenn man nur die mittlere Beleuchtung ermitteln will. Genau ist sie nur bei direkter Beleuchtung, weil sie punktförmige Lichtquellen voraussetzt und das an Wände und Decke reflektierte Licht nicht berücksichtigen kann. Für indirekte und halbindirekte Beleuchtung ist die punktweise Berechnung z. B. nicht zu gebrauchen.

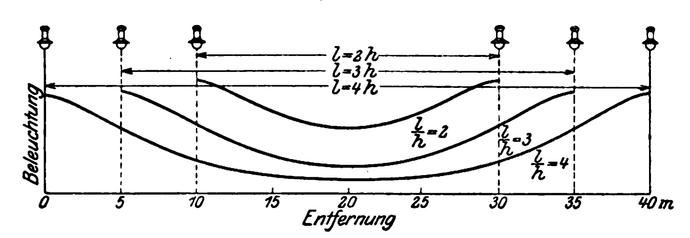


Abb. 441. Beleuchtungskurven für zwei Lampen.

(725) Beleuchtung von Straßen und Plätzen. Bei der Straßenbeleuchtung ist neben der mittleren Beleuchtungsstärke [Werte siehe (721)] die Ungleichmäßigkeit von besonderer Bedeutung. Sie wird um so größer, je weiter die Lampen voneinander entfernt sind. In Abb. 441 ist der Verlauf der Beleuchtungskurven für 3 Lampen in den Entfernungen $l=2h$, $l=3h$ und $l=4h$ dargestellt. Bei der Ermittelung derartiger Beleuchtungskurven für Straßenbeleuchtung beachte man, daß jeder Punkt mindestens von 2, wenn nicht von mehr Seiten beleuchtet wird, so daß die Summe der einzelnen Beleuchtungsstärken genommen werden muß.

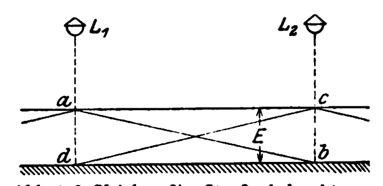


Abb. 442. Gleichmäßige Straßenbeleuchtung.

Die Ungleichmäßigkeit hängt nicht von dem absoluten Werte von l oder h ab, sondern nur von deren Verhältnis l/h.

Eine gleichmäßige Straßenbeleuchtung wird z. B. erreicht, wenn die Beleuchtungskurve jeder einzelnen Lampe bis zur nächsten gleichmäßig nach 0 abfällt (Abb. 442).

Die Lichtverteilung zur Erzielung dieser Beleuchtung kann man durch die Konstruktion in (724) ermitteln, wenn man in umgekehrter Folge vor-

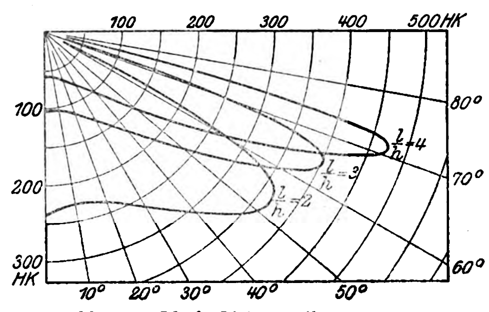


Abb. 443. Ideale Lichtverteilungskurven.

geht. Man erhält dann für 3 verschiedene Werte von l/h die idealen Lichtverteilungskurven in Abb. 443. Derartige Kurven mit sehr breiter Streuung können nicht mittels Reflektoren erzielt werden, sondern nur mittels Prismenglocken (Diopterglocken), welche das Licht seitwärts lenken (Abb. 444).

(726) Lichtstrommethoden. Die mittlere Beleuchtung einer Fläche erhält man direkt, ohne den Umweg über die punktweise Berechnung, wenn der Lichtstrom bekannt ist, der von der Lichtquelle aus auf diese Fläche auftrifft, und den man durch die Größe der Fläche dividiert. Ist diese Fläche rund und befindet sich die Lichtquelle über dem Mittelpunkt dieses Kreises, so wird der auftreffende Lichtstrom durch einen Kegel begrenzt, dessen halber Spitzenwinkel durch die Gleichung $\operatorname{tg} \alpha = r/h$ gegeben ist. Hierin ist $r = \sqrt{F/\pi}$, wenn F die beleuchtete Kreisfläche ist.

Die Werte des Lichtstroms bis zum $\sphericalangle\, \alpha$ kann man aus der Lichtverteilung berechnen, wenn man jeden Lichtstärkewert bei 5°, 15°, 25° usw. mit dem zugehörigen Zonenfaktor (290) multipliziert und die Lichtströme der einzelnen Zonen bis zum $\sphericalangle\, \alpha$ addiert.

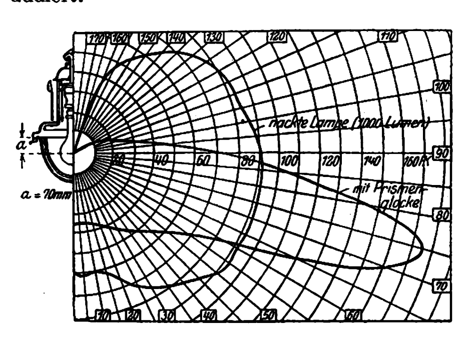


Abb. 444. Lichtverteilung einer Prismenglocke.

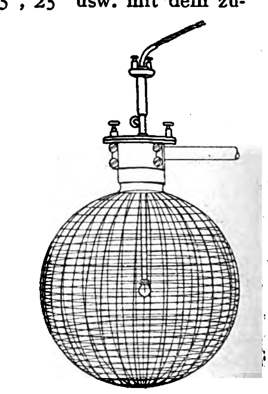


Abb. 445. Lichtstromkugel nach Teichmüller.

Man kann den Lichtstrom auch durch Planimetrieren aus dem Rousseauschen Diagramm (290) erhalten, wenn man dieses durch die dem $\sphericalangle\, \alpha$ entsprechende Horizontale zerlegt.

Aus den Lichtstromkurven oder Lichtstromtafeln nach Bloch (Grundzüge der Beleuchtungstechnik 1907, S. 47) kann man den Lichtstrom bis $\sphericalangle\, \alpha$ unmittelbar entnehmen.

Annäherungsweise kann man diese Berechnung der mittleren Beleuchtung auch für Flächen durchführen, die nicht kreisförmig, sondern rechteckig sind, indem man sich die Rechtecke in Kreise von gleichem Inhalt umgewandelt denkt.

(727) Lichtstromkugel von Teichmüller. Um auch bei rechteckigen Flächen, die in der Praxis weit häufiger vorkommen als runde, den auftreffenden Lichtstrom genau bestimmen zu können, hat Högner (ETZ 1910, S. 234) Lichtstromtafeln für rechteckige Flächen aufgestellt. Da diese immer nur für bestimmte typische Lichtverteilungen gelten können, bedeutet es einen wesentlichen Fortschritt, daß mittels der Lichtstromkugel von Teichmüller Raumwinkel und damit Lichtströme unmittelbar gemessen werden können. Diese Kugel (Abb. 445) trägt auf ihrer Oberfläche ein Netz, dessen Striche durch eine kleine Glühlampe in der Mitte der Kugel als Schatten projiziert werden. Jedes Viereck auf der Kugeloberfläche entspricht 0,01 Raumwinkeleinheit oder 1/1257 der gesamten Kugelfläche.

Um den Raumwinkel zu bestimmen, den eine Fläche von der Lichtquelle aus gerechnet einnimmt, bringt man die punktförmige Glühlampe in der Kugel an die

Stelle der Lichtquelle und zählt die auf die Fläche projizierten Vierecke. Durch 100 dividiert liefern sie den Raumwinkel ω in Raumwinkeleinheiten. Bei gleichmäßiger Lichtverteilung (J = konst) erhält man den Lichtstrom $\Phi = \omega \cdot J$. Bei ungleichmäßiger Lichtverteilung müssen die Raumwinkelprojektionen für jede Zone mit der zugehörigen Lichtstärke multipliziert werden.

Mit der Lichtstromkugel (hergestellt von Krüss-Hamburg) kann man nicht nur die mittlere Beleuchtung bestimmen, sondern auch Maximum und Minimum der Beleuchtung und damit den Ungleichmäßigkeitsgrad.

Literatur: Elektrotechnik u. Maschinenbau 1918, S. 261. — Licht und Lampe 1919, S. 108.

(728) Wirkungsgradmethode. Diese Methode eignet sich zum raschen überschläglichen Berechnen von Beleuchtungsanlagen, besonders bei der halbindirekten und indirekten Beleuchtung, wo die oben beschriebenen Verfahren mehr oder weniger versagen. Dafür ist die Wirkungsgradmethode in ihrer Anwendung auf Innenräume beschränkt.

Von dem Lichtstrom, den eine Lichtquelle erzeugt, geht zunächst ein Teil durch Reflektor, Glocke und sonstige Zubehörteile verloren. Högner spricht von einem „Nutzfaktor" der Armatur (Lichtstrahlung und Beleuchtung. Braunschweig 1906, S. 48).

Der Lichtstrom, welcher die Armatur der Lichtquelle verläßt, fällt niemals vollständig auf die zu beleuchtende Fläche. Ein Teil wird vielmehr auf Decke und Wände fallen und von dort unter einem gewissen Reflexionsverlust zurückgeworfen werden. Von diesem zurückgeworfenen Licht wird wieder nur ein Teil die Arbeitsfläche beleuchten usw. Högner spricht demgemäß auch von einem „Nutzfaktor" des Raumes, und versteht darunter das Verhältnis des insgesamt auf die Arbeitsfläche auftreffenden Lichtstroms zu dem Lichtstrom der aus der Armatur trat.

Nutzfaktor der Armatur × Nutzfaktor des Raumes liefern den Nutzfaktor oder „Wirkungsgrad" η der ganzen Beleuchtungsanlage. Wir haben hierunter also das Verhältnis des zur Beleuchtung E der Arbeitsfläche F ausgenutzten Lichtstromes ($E \cdot F$ Lumen) zu dem in den Lichtquellen erzeugten Lichtstrom Φ zu verstehen, so daß

$$\eta = \frac{E \cdot F}{\Phi}$$

oder

$$\Phi = \frac{E \cdot F}{\eta}.$$

Hat man sich für eine bestimmte Beleuchtungsstärke entschieden, etwa an Hand der Zahlen aus (721), so braucht man, weil die Fläche F ohne weiteres bekannt ist, nur den Wirkungsgrad η zu kennen, um den Gesamtlichtstrom Φ zu ermitteln, den man auf eine entsprechende Anzahl von Lampen verteilen kann.

Lichtstromtabelle für Gasfüllungslampen.

Lampen mit Edisonfassung			Lampen mit Goliathfassung		
Watt	Lumen bei 100—130 V.	Lumen bei 200—240 V.	Watt	Lumen bei 100—130 V.	Lumen bei 200—240 V.
40	450	—	300	5 600	5 000
60	750	—	500	10 000	9 200
75	1050	850	750	15 000	14 000
100	1 500	1250	1000	21 000	19 000
150	2500	2100	1 500	32 000	30 000
200	3500	3000			

Obgleich der Wirkungsgrad einer Beleuchtungsanlage von vielen Faktoren abhängig ist, weist er doch nicht dementsprechend große Unterschiede auf. Damit nimmt auch die Gefahr ab, beim Schätzen des Wirkungsgrades große Fehler zu begehen. Bei Anlagen mit tiefstrahlendem Reflektor ist z. B. der Nutzfaktor der Armatur gering, der Nutzfaktor des Raumes dagegen groß. Verwendet man dagegen Glühlampen mit Mattierung, so ist der Nutzfaktor der Armatur hoch, die Ausnutzung des Lichtes im Raume dagegen schlecht. Der Wirkungsgrad für die gesamte Beleuchtungsanlage kann infolge dieses Ausgleichs derselbe sein.

Heyck und Högner geben z. B. den Wirkungsgrad $\eta = 0{,}44$ für vorwiegend direktes Licht, für diffuses vorwiegend tiefstrahlendes Licht und auch für halbindirektes Licht an. Für ganzindirektes Licht $\eta = 0{,}33$.

Halbertsma gibt (Fabrikbeleuchtung. München 1918, S. 159) folgende Wirkungsgradtabelle:

Art des Raumes	Beleuchtung	Wirkungsgrad
Räume mit weißer Decke und hellen Wänden	halbindirekt oder direkt mit lichtstreuender Glocke	45—50 %
	indirekt	35—40 %
Werkstätten mit reflektierender Decke	direkt mit Reflektoren	30—35 %
	halbindirekt	30 %
Werkstätten ohne reflektierende Decke	direkt mit lichtstreuenden Glocken	25—30 %
Schmieden, Gießereien		15—20 %

Bei indirekter Beleuchtung ist der Wirkungsgrad proportional dem Reflexionsvermögen der Decke.

Eine ausführliche Tabelle von Harrison (Gen. El. Rev. 1918, S. 419) berücksichtigt nicht nur den Einfluß der Lichtverteilung (Armaturtyp) und den Nutzfaktor der Armatur, sondern auch die Beschaffenheit von Decke und Wänden und die Abmessungen des Raumes. Letztere spielen insofern eine Rolle, als bei größeren Räumen die Wandflächen im Verhältnis zur Bodenfläche geringer sind als bei kleinen Räumen und demgemäß diese Verlustquelle um so weniger Bedeutung hat, je größer der Raum ist. Die Wirkungsgradtabelle nach Harrison gilt zunächst nur für quadratische Räume. Sie enthält die Abmessungen des Raumes (Quadratseite) nicht in Längseinheiten, sondern als Verhältnis der Quadratseite zur Lichtpunkthöhe. Letztere ist nämlich nicht, wie bisweilen angenommen wird, mit ihrem absoluten Wert einzusetzen, wie denn überhaupt die Anwendung des „quadratischen Entfernungsgesetzes" bei der Wirkungsgradmethode unzulässig ist. Maßgebend ist dagegen das Verhältnis der Quadratseite zur Lichtpunkthöhe, weil für die Ausnutzung des Lichtes ein Proportionalitätsgesetz insofern gilt, als der Wirkungsgrad des Raumes bei gleicher Lichtverteilung und gleicher Beschaffenheit der Wände sich nicht ändert, wenn die Abmessungen des Raumes und die Lichtpunkthöhe sämtlich im gleichen Verhältnis vergrößert oder verkleinert werden.

Bei rechteckigen Räumen mit der Länge l und der Breite b erhält man den Wirkungsgrad, der zwischen demjenigen eines quadratischen Raumes mit der Seite $b\,(\eta_b)$ und einem andern mit der Seite $l\,(\eta_l)$ liegt, nach der Gleichung

$$\eta = \eta_b + \frac{1}{3}(\eta_l - \eta_b).$$

Beleuchtungskörper	Lichtverteilung	$\Phi = \Phi_{oben} / \Phi_{unten}$ in %	Raumbreite / Lichtpunkthöhe	Decke hell (70 %) Wände hell 50 %	Decke hell (70 %) Wände mittel 35 %	Decke hell (70 %) Wände dunkel 20 %	Decke mittel (50 %) Wände mittel 35 %	Decke mittel (50 %) Wände dunkel 20 %	Decke dunkel (30 %) Wände dunkel 20 %
Holophane			1	0,42	0,38	0,35	0,36	0,34	0,33
		22	1,5	0,50	0,46	0,43	0,44	0,42	0,41
		87	2	0,56	0,52	0,49	0,50	0,47	0,45
		65	3	0,63	0,59	0,55	0,56	0,53	0,51
mattierte Lampe			5	0,70	0,66	0,63	0,63	0,60	0,57
dünnes Opal			1	0,31	0,27	0,24	0,24	0,21	0,18
		35	1,5	0,37	0,33	0,30	0,30	0,27	0,24
		85	2	0,43	0,39	0,35	0,34	0,31	0,27
		50	3	0,49	0,45	0,41	0,39	0,36	0,31
mattierte Lampe			5	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,36
dichtes Opal			1	0,41	0,37	0,34	0,35	0,33	0,32
		20	1,5	0,49	0,45	0,42	0,43	0,41	0,39
		80	2	0,54	0,50	0,47	0,48	0,46	0,44
		60	3	0,60	0,56	0,53	0,53	0,51	0,49
mattierte Lampe			5	0,67	0,63	0,59	0,59	0,57	0,54
tiefer Blechrefl.			1	0,38	0,36	0,34	0,35	0,33	0,33
		0	1,5	0,45	0,43	0,41	0,42	0,40	0,40
		65	2	0,49	0,47	0,45	0,46	0,44	0,44
		65	3	0,54	0,52	0,50	0,51	0,49	0,49
emailliert			5	0,59	0,57	0,55	0,56	0,54	0,54
flacher Blechrefl.			1	0,43	0,40	0,38	0,39	0,37	0,37
		0	1,5	0,52	0,49	0,47	0,48	0,46	0,46
		80	2	0,57	0,54	0,52	0,53	0,51	0,51
		80	3	0,63	0,60	0,58	0,59	0,57	0,57
emailliert			5	0,69	0,66	0,64	0,65	0,63	0,63
indirekt			1	0,22	0,19	0,17	0,14	0,12	0,07
		80	1,5	0,27	0,24	0,22	0,17	0,15	0,09
		80	2	0,31	0,28	0,26	0,20	0,18	0,11
		0	3	0,36	0,33	0,31	0,24	0,22	0,13
versilb. Glas			5	0,42	0,39	0,37	0,28	0,26	0,16
halbindirekt			1	0,27	0,24	0,21	0,20	0,17	0,14
		60	1,5	0,34	0,30	0,27	0,25	0,22	0,18
		85	2	0,39	0,35	0,32	0,29	0,26	0,21
		25	3	0,45	0,41	0,38	0,34	0,31	0,25
dünnes Opal			5	0,51	0,47	0,44	0,40	0,37	0,29
halbindirekt			1	0,24	0,21	0,19	0,16	0,14	0,10
		70	1,5	0,30	0,27	0,24	0,20	0,18	0,13
		80	2	0,34	0,31	0,28	0,23	0,21	0,15
		10	3	0,39	0,36	0,33	0,27	0,25	0,18
dichtes Opal			5	0,45	0,42	0,39	0,32	0,30	0,21
Glocke			1	0,23	0,20	0,17	0,18	0,16	0,14
		35	1,5	0,30	0,26	0,23	0,24	0,21	0,19
		75	2	0,35	0,31	0,28	0,28	0,25	0,22
		40	3	0,41	0,37	0,34	0,33	0,30	0,26
dünnes Opal			5	0,48	0,44	0,41	0,39	0,36	0,31
halbindirekt mit Reflektor			1	0,32	0,28	0,26	0,27	0,25	0,23
		20	1,5	0,40	0,36	0,33	0,34	0,32	0,30
		80	2	0,45	0,41	0,38	0,39	0,37	0,35
		60	3	0,52	0,47	0,44	0,45	0,42	0,40
Opal			5	0,59	0,54	0,51	0,51	0,48	0,46

(729) Winke für die Beleuchtung von Innenräumen. Unterteilung der Lampen. Aus der Glühlampentabelle auf S. 507 geht hervor, daß man bei 220 V einen Lichtstrom von 5000 Lm auf folgende Weise erzeugen kann:

1. 5000 Lm durch 1 Lampe von 300 W . . . . =300 W
2. 5100 Lm durch 1 Lampe von 200 W und 1 Lampe von 150 W . =350 W
3. 5050 Lm durch 2 Lampen von 150 W und 1 Lampe von 75 W . =375 W
4. 5000 Lm durch 4 Lampen von 100 W . . . . =400 W
5. 5100 Lm durch 6 Lampen von 75 W . . . . =450 W

Bei Verwendung von Gasfüllungslampen soll man demnach die Lichtquellen nicht weiter unterteilen als zur Erzielung einer genügend gleichmäßigen Beleuchtung unbedingt erforderlich. Auch werden Installation, Glühlampen und Armaturen (Beleuchtungskörper) verhältnismäßig teurer in der Anschaffung, je weiter die Unterteilung getrieben wird. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist daher die weitgehende Unterteilung bei Kronen, Deckenbeleuchtungen und „mehrflammigen“ Armaturen nicht zu rechtfertigen.

Lampenentfernung. Für die mit Rücksicht auf genügend gleichmäßige Beleuchtung einzuhaltende gegenseitige Entfernung der Lichtquellen ist ebenfalls nicht der absolute Wert dieser Entfernung maßgebend, sondern (725) das Verhältnis der Entfernung zur Aufhängehöhe der Lampen. Es sei das Verhältnis l/h nicht größer als

0,75 bei Reflektoren für konzentriertes Licht,
1,5 bei lichtstreuenden Glocken,
1,8 bei halbindirekter Beleuchtung,
1,8 bei indirekter Beleuchtung.

h ist der Abstand von der Arbeitsfläche (1 m über Fußboden) bis zum Beleuchtungskörper. Nur bei der indirekten Beleuchtung ist h bis zur Decke zu nehmen).

Einfluß der Stellung der Lichtquelle auf die Lichtverteilung. Die Lichtverteilung einer Armatur (Glocke, Reflektor oder Kombination dieser beiden) ist abhängig von der Stellung der Lichtquelle zu ihrer Armatur. Insbesondere kann bei Reflektoren die beabsichtigte Lichtverteilung gänzlich geändert werden, wenn die Lichtquelle sich an falscher Stelle befindet (ETZ 1917, S. 485). Aus diesem Grunde ist die Verwendung von Armaturen mit verstellbarer Fassung von Vorteil, bei denen man nach der Montage die Lichtquelle so einstellen kann, daß die gewünschte Lichtverteilung erreicht wird.

Reflektoren für Arbeitsplatzbeleuchtung. Reflektoren, die für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen dienen, sollten stets eine derart tiefe Form aufweisen, daß die Lichtquelle selbst dem Arbeitenden verborgen bleibt. Derartige Reflektoren werfen außerdem das meiste Licht nach unten und sind daher auch aus wirtschaftlichen Gründen für die Beleuchtung von Arbeitsplätzen zu empfehlen.

Schatten und Lichtstreifen auf Decken und Wänden. Lichtquellen von sehr geringer Ausdehnung (Bogenlampen, Gasfüllungslampen) werfen von Ketten, Röhren, Schalenhaltern und ähnlichen Bestandteilen der Beleuchtungskörper störende Schatten auf Decke und Wände. Ferner entstehen bei geblasenen Hellgläsern mit ihren stets vorhandenen Schlieren und bei prismatischen, sowie geschliffenen Gläsern infolge der Brechung des Lichtes helle Streifen auf der Decke und den Wänden. Beide Erscheinungen beeinträchtigen das Aussehen der Beleuchtungsanlage wesentlich. Sie können vermieden werden, indem entweder die Glühlampe ganz oder teilweise oder die betreffenden Glasteile leicht mattiert (seidenmattiert) werden. Die hierdurch hervorgerufene geringe Streuung genügt, um Schatten und Streifen zum Verschwinden zu bringen. Dagegen genügt sie nicht, um das Auge gegen Blendung zu schützen, wenn es unmittelbar in die Licht-

quelle hineinsehen kann. In diesem Falle ist die Verwendung vollkommen lichtstreuender Gläser (Opalüberfang und Opal) angezeigt.

Beleuchtungsproben. Wo in bezug auf die Berechnung der Beleuchtung Unsicherheit besteht, nimmt man häufig zu einer Beleuchtungsprobe die Zuflucht. Es ist hierbei erforderlich, daß der Versuch vollständig, d. h. unter Verwendung sämtlicher für den betreffenden Raum oder einen scharf begrenzten Abschnitt desselben bestimmten Lampen ausgeführt wird, da das Anbringen einer Lichtquelle kein Urteil über die später auftretende Verteilung der Beleuchtung zu bilden gestattet.

Theaterbeleuchtung.

(730) Allgemeines. Sicherheit. Zur Erhöhung der Feuersicherheit und zum Schutze des Publikums gelten besondere Bestimmungen der Verbandsvorschriften; die wichtigste bezieht sich auf die Anordnung der Lampen eines Raumes in verschiedenen, getrennt gesicherten Stromkreisen.

Stromversorgung. Die Theater sind fast durchweg an die städtischen Netze angeschlossen. Sind eigene Erzeugungsanlagen vorhanden, so ist immer ein Reserveanschluß an das Netz vorgesehen. Wegen der hohen Spitzenbelastung des Netzes durch die Theater und wegen der in kurzen Zeiträumen stark wechselnden Ausnützung des Anschlußwertes wird durch Gewährung von Sondertarifen die Anlage von Akkumulatorenbatterien in Verbindung mit Umformeranlagen gefördert. Während einer Sperrzeit (im Winter von 4 bis 8, im Sommer von 7 bis 8) darf dann kein Strom aus dem Netze entnommen werden.

(731) Arten der Beleuchtung. In neueren Theatern kommt für die allgemeine Beleuchtung ausschließlich Glühlicht zur Anwendung. Das gilt auch für die gewöhnliche Szenenbeleuchtung. Zur Erzielung besonderer Effekte: Darstellung des Blitzes, von Wolken, Schnee und Regen usw. mit Projektionsapparaten werden vorzugsweise Bogenlampen benutzt. Der Kuppelhorizont nach Fortuny wird in älteren Anlagen noch durch Bogenlampen beleuchtet, in neueren durch starke Gasfüllungslampen. (Paetow, ETZ 1909, S. 695; Rosenberg, Z. V. D. I. 1911, S. 1366; H. Lux, Z. Bel. 1914, Heft 13 bis 17.)

Die Szenenbeleuchtung durch Glühlicht wird entweder nach dem Lautenschlägerschen Einlampensystem oder dem Brandtschen Mehrlampensystem ausgeführt. Beim Einlampensystem weist jeder Beleuchtungskörper nur weiße Lampen auf. Farbenwirkungen werden durch drehbare, die Lampen umgebende Gelatineschirme mit mehreren Farbstreifen erzielt. Die Farbenschirme werden durch Schnurzüge vom Beleuchterstande aus bewegt. Da dieses System nur gröbere Übergänge von einer Farbe in die andere gestattet, so ist es nur bei kleineren Theatern im Gebrauch. Eine besondere Art des Einlampensystems ist von der AEG ausgebildet (DRP 220616). Das farbige Licht wird hier in der Weise erzeugt, daß der Reflektor des Beleuchtungskörpers gegen den das Licht der Lampen geworfen wird, farbig gestrichen ist, so daß vom Reflektor aus das Licht in der Farbe des Reflektors zurückgeworfen wird. Die weißen Lampen sind hierzu in eine der Zahl der gewünschten Farben entsprechende Anzahl von Stromkreisen geschaltet. — Bei dem Mehrlampensystem enthält jeder Beleuchtungskörper drei oder vier Abteilungen gefärbter Glühlampen. Je nach der auf der Bühne gewünschten Färbung werden die entsprechenden Lampen eingeschaltet und ihre Lichtstärke durch Änderung der Stromstärke geregelt. Hierdurch lassen sich ganz allmähliche und zarte Übergänge von einer Farbe in die andere erzielen. Beim Dreilampensystem kommen weiße, rote und blaugrüne Lampen zur Anwendung. Beim Vierlampensystem treten noch gelbe hinzu.

Horizont. In neueren Theatern spielt der Fortunysche Kuppelhorizont oder der Max Reinhardtsche Rundhorizont als sekundäre Lichtquelle eine große Rolle. Die mattweiße, stetig gekrümmte Fläche im

Bühnenhintergrunde wirkt bei diffuser Beleuchtung wie ein Himmelshorizont von unendlicher Tiefe. — Nach dem Fortunysystem wird der Kuppelhorizont selbst wieder indirekt beleuchtet. Das Licht starker Bogenlampen fällt zunächst auf breite Seidenbänder, die aus verschiedenfarbigen Streifen zusammengesetzt sind, und erst das von diesen Seidenbändern reflektierte Licht dient zur Ausleuchtung des Kuppelhorizontes. Die Seidenbänder sind rouleauartig aufgerollt; mit vom Beleuchterstande aus gesteuerten Elektromotoren können sie so abgerollt werden, daß die gewünschte Farbe zur Geltung kommt. Da die einzelnen Farbstreifen so aneinandergefügt sind, daß die eine Farbe mit zahlreichen und langen dreieckigen Zungen in die andere übergreift, können zarte Farbübergänge erzeugt werden. Die Seidenbandreflektoren und Bogenlampen hängen hinter der Proszeniumswand oder den Soffitten; außerdem sind noch fahrbare Reflektoren hinter Versatzstücken vorgesehen, um eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung des Kuppelhorizontes und Aufhellung der von Dekorationsstücken ausgesandten Schlagschatten bewirken zu können. — An Stelle der Bogenlampen werden neuerdings auch starke Gasfüllungslampen in Verbindung mit den Seidenbandreflektoren angewandt. — Die Ökonomie der Fortunybeleuchtung ist wesentlich besser als die des Brandtschen Mehrlampensystems. Setzt man bei gleichem Energieaufwande die Beleuchtung beim Mehrlampensystem gleich 1, so ist sie beim Fortunyschen System:

Licht	senkrecht	wagrecht
weiß	3	5,6
rot	2,7	5,3
blau	2,5	5

Nach dem System der Siemens-Schuckertwerke werden zum Ausleuchten des Kuppel- oder Rundhorizontes, bzw. von Freilandschaften starke Gasfüllungslampen in Laternengehäusen benutzt. Das Gehäuse besitzt an der Vorderseite einen Ausschnitt, der durch eine stark streuende Glashülle geschlossen ist. Im Innern befindet sich eine drehbare Farbenglocke mit verschiedenen Farbstreifen, die durch einen Elektromotor in die gewünschte Stellung gebracht wird. Außer den weißen werden noch rote, gelbe, grüne, blaue und violette Farbtöne angewandt. Durch Änderung der Stromstärke und Fernsteuerung der Farbenglocken kann jede Helligkeit und jede Farbabstufung erzeugt werden. Zarte Farbübergänge werden dadurch erzielt, daß die Farbglocken nicht alle gleichzeitig für dieselbe Farbe eingestellt werden. Zum Ausleuchten des Horizontes sind bis 18 große Gasfüllungslampen in mehreren Reihen an einem Rahmen befestigt, der vom Schnürboden herabhängt und, durch Gegengewichte ausgeglichen, in jede gewünschte Stellung gebracht werden kann. Einzelne Laternen dieses Rahmens enthalten anstatt der Farbglocken drehbare Glasglocken mit aufgemalten Wolkenbildern. Wegen seiner großen Einfachheit kann dieses Beleuchtungssystem auch nachträglich in jedem Bühnenhause eingebaut werden.

Das Einlampensystem mit Gasfüllungslampen ist dem Mehrfarbensystem von Brandt hinsichtlich der Ausnutzung der gesamten installierten Lampen weit überlegen. Nach Messungen in einem größeren deutschen Stadttheater ergab sich das folgende Resultat:

Mehrlampensystem	Anschlußwert	mittlerer Verbrauch
für weiße Lampen	60,6 kW	13 kW = 22%
„ rote Lampen	15,2 „	1 „ = 6,5%
„ grüne und gelbe Lampen	68,6 „	7 „ = 10%

Die Ausnützung ist also verschwindend klein, sämtliche installierte Lampen waren aber erforderlich, um, wenn auch nur kurzzeitig, bestimmte Bühnenwirkungen hervorbringen zu können.

Bei großen neueren Theatern kommt der Kuppel- oder Rundhorizont in Verbindung mit dem Mehrlampensystem zur Anwendung.

(732) Die Bühnenbeleuchtungskörper. Die Beleuchtungskörper bestehen bei dem Einfarben- und Mehrfarbensystem aus leichten eisernen Rahmen, an die die Glühlampenfassungen fest angebaut sind. Ein Drahtgitter schützt die Lampen. Diese Beleuchtungskörper werden bei der Soffittenbeleuchtung an Seilzügen horizontal aufgehängt, bei der Kulissenbeleuchtung hinter den einzelnen Kulissen senkrecht aufgestellt. Der Rampenbeleuchtungskörper ist fest montiert. Außerdem kommen noch Versatzständer und Versatzlatten mit Glühlampen zur Anwendung, die hinter den Kulissen oder passenden Versatzstücken nach Bedürfnis aufgestellt werden, um Dekorationseinzelheiten besonders hervorzuheben. Als Lampen kommen heute ausschließlich Metallfadenlampen zur Anwendung. Besonders vorteilhaft zur Erzielung einer gleichmäßigen Beleuchtung sind Röhrenlampen, die hintereinander und in mehreren Reihen nebeneinander angeordnet sind. Der Anschluß der beweglichen Beleuchtungskörper geschieht mit mehrpoligen Steckern und ebensolchen Steckdosen, die unterhalb des Bühnenfußbodens und an den Bühnenwänden in reichlicher Zahl vorgesehen sind. — Zur hellen Beleuchtung der Szene selbst, wie sie bei großen Freilandschaften, z. B. Meistersinger III. Akt, Festwiese, nötig ist, werden direkt wirkende Beleuchtungskörper verwandt. Sie bestehen aus Rahmen, die an jedem beliebigen Prospektzuge aufgehängt werden können. Diese Rahmen nehmen unten offene Laternen für große Gasfüllungslampen auf. Vor die Laternenöffnungen können Farbscheiben durch Seilzug vorgeschaltet werden. Auch die sehr wirksamen Wiskott reflektoren der AEG in Verbindung mit Gasfüllungslampen finden für diese Zwecke Verwendung.

(733) Die Regulierung der Bühnenbeleuchtung. Zur Bedienung und Regulierung der gesamten Bühnenbeleuchtung dient der Bühnenregulator. Entsprechend dem Ein- oder Mehrlampensystem sind die Bühnenregulatoren als Ein- oder Mehrhebelregulatoren ausgebildet. Jeder Lampenstromkreis — bei großen Bühnen bis zu 150 — erhält einen einfachen, vielfach unterteilten Widerstand mit besonderen Kontaktbahnen, an denen der Schleifkontakt entlang gleitet. Die Zahl der Abstufungen ist so groß gewählt, daß bei Übergang von Stufe zu Stufe im Lichte der Lampen keine schroffen Übergänge stattfinden. Es kommen 50 bis 100 Abstufungen zur Anwendung. Wenn einer Lampe so viel Widerstand vorgeschaltet ist, daß sie nur noch dunkelrot glüht, wird durch einen Endausschalter ihre Abschaltung bewirkt. Der Schleifkontakt jedes Widerstandes wird vermittelst Seilübertragung von einem Stellhebel des Stellwerkes aus bedient. Die Stellhebel für die einzelnen Stromkreise sind nebeneinander und die Hebelgruppen untereinander angeordnet. Die Stellhebel können miteinander gekuppelt werden, so daß ganze Gruppen von Stromkreisen gleichzeitig regulierbar sind. Für jede Lampenfarbe ist immer eine ganze Reihe nebeneinander liegender Stellhebel vorgesehen. Die Reihen für die verschiedenen Farben liegen dann parallel untereinander. Auch diese Gruppen können nach Bedarf miteinander gekuppelt werden. Es lassen sich also die mannigfaltigsten Zusammenstellungen bilden, und so ist es möglich, jede gewünschte Beleuchtungswirkung und jeden Farbübergang zu erzeugen. Während z. B. die eine Farbe verdunkelt wird, kann man schon vor deren Erlöschen eine andere Farbe mit der geringsten Helligkeit einstellen und allmählich anwachsen lassen, um sanfte Helligkeits- und Farbenübergänge zu erzeugen. — Das Stellwerk für das Beleuchtungssystem mit Gasfüllungslampen ist, entsprechend der geringeren Zahl von Stromkreisen, erheblich einfacher. Es wird hier nur die Helligkeit der Lampen durch Einschalten von Widerständen reguliert. Für den Farbwechsel kommt dann noch eine Farbschalttafel hinzu, an deren Farbfeldern der Farbwechsel mittels eines Umschalters vorgenommen wird, durch den die

Lampenmotoren zum Hervorholen der einzelnen Farben gesteuert werden. Ein besonderes „Wolkenfeld" auf dieser Schalttafel enthält die Betätigungsvorrichtung für die Wolkenlampen, nämlich den Regulierwiderstand für die Wolkengeschwindigkeit, den Druckknopf für das Hervorholen eines beliebigen Wolkengebildes und den Umschalter zum Vorziehen roter Filter vor die Wolkenlampen.

Die Bühnenregulatoren werden zweckmäßig an der Hinterseite der Proszeniumswand angeordnet, von wo der Beleuchter das ganze Bühnenbild übersehen kann. Die Regulierwiderstände werden meist getrennt von den Regulatoren aufgestellt, zweckmäßig im Bühnenunterraume, häufig aber auch oberhalb der Regulatoren an der Proszeniumswand.

Berechnung der Widerstände. Da die Bühnenbeleuchtung ganz allmähliche Übergänge in den Helligkeits- und Farbenabstufungen verlangt, die dem Auge nicht unangenehm auffallen dürfen, so wurde von E. Löbbecke (ETZ 1890, S. 234) versucht, auf Grund des Weber-Fechnerschen Grundgesetzes die erforderlichen Helligkeitsstufen theoretisch abzuleiten. Hiernach müssen die Lichtstärken so geändert werden, daß die Empfindungsstärke proportional den Logarithmen der Reizstärken wachsen oder abnehmen. D. h. die Lichtstärken müssen in einer geometrischen Reihe wachsen, wenn die zunehmende Beleuchtung den Eindruck der gleichmäßigen Änderung für das Auge behalten soll. Hierbei ist von dem Schwellenwerte des Reizes auszugehen. Zur Durchführung der Rechnung benutzt man Lichtstärken- und Stromstärkenkurve der Lampensorte in Abhängigkeit von der Spannung (Kurven HK und A der Abb. 446). Hierauf werden für eine bestimmte Anzahl Stufen, z. B. 25, die Lichtstärken so berechnet, daß sie nach einer geometrischen Reihe abnehmen. Hiernach gilt:

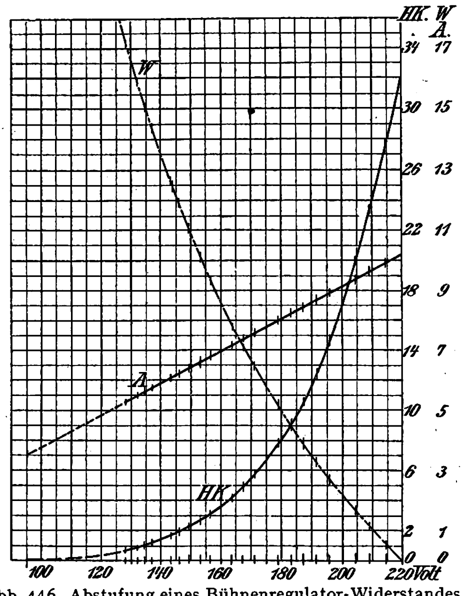


Abb. 446. Abstufung eines Bühnenregulator-Widerstandes.

$$J \cdot v^{25} = {}^1/_{50} J, \quad \text{also} \quad v = \sqrt[25]{{}^1/_{50}} = 0{,}855,$$

wobei v den Quotienten zweier aufeinanderfolgender Glieder der Reihe darstellt. Man berechnet nun zunächst die im Widerstande zu vernichtende Spannung für jede Helligkeitsstufe und hieraus den zugehörigen Widerstand. Diesen trägt man gleichfalls als Kurve auf (Kurve W in Abb. 446) und kann nun aus dieser den Widerstand jeder Stufe abgreifen. Jede einzelne Stufe wird dann noch weiter in drei gleiche Stufen geteilt, so daß insgesamt 75 Stufen vorhanden sind, um eine 32 HK-Lampe auf 0,64 HK herabzuregulieren. Für die weitere Abnahme der Helligkeit bis zum völligen Verlöschen werden schließlich noch 25 weitere Stufen angefügt, wofür die Stromstärken aus der verlängerten Kurve A zu entnehmen sind. Da Helligkeitsabstufungen bei Glühlampen zugleich auch immer mit Farben-

veränderungen verbunden sind, so können diese Berechnungen nur zu einem ungefähren Anhalt für die Konstruktion der Regelapparate dienen. In der Praxis werden sie nach Erfahrungsgrundsätzen aufgebaut.

(734) Effektbeleuchtung. Theaterblitze werden in zwei voneinander verschiedenen Arten erzeugt, je nachdem man das Bild eines Blitzes oder dessen momentane Lichtwirkung darzustellen wünscht. Im ersten Falle wirft man das Lichtbild eines Blitzes mit dem Projektionsapparat auf den Bühnenhintergrund, im zweiten Falle läßt man Blitzbogenlampen aufflammen, die so konstruiert sind, daß der Lichtbogen rasch in die Länge gezogen wird, bis er abreißt. — Lodernde Flammen werden von Schwabe & Co. mittels wehender Seidenbänder dargestellt. Die Bänder werden von einem Ventilator in Bewegung gehalten und gleichzeitig durch gelbe und hellrote Glühlampen beleuchtet. — Flimmernde Sterne ahmt man nach einem Patente der Siemens-Schuckertwerke durch kleine Lämpchen für 5 bis 6 V mit vorgestellten Linsen nach, die in den Bühnenhintergrund eingesetzt werden. Die Lämpchen werden von einem Wechselstromumformer für niedrige Spannung gespeist. Mit Vorteil werden diese Lämpchen auf die drei Phasen des Drehstromes verteilt. Bei Anwendung einer niedrigen Periodenzahl kann so das Funkeln der Sterne sehr naturgetreu nachgeahmt werden.

(735) Notbeleuchtung. In allen Teilen des Theaters ist eine sicher funktionierende Notbeleuchtung anzulegen.

Nach dem Systeme von Schwabe & Co. werden hierfür Akkumulatorenlampen mit Zeitschaltung vorgesehen, die an allen Ausgängen und anderen wichtigen Stellen unabhängig voneinander angebracht werden. Zur Ladung werden diese Akkumulatoren entweder nach einem besonderen Laderaum gebracht, oder sie sind auch hintereinander in den Stromkreis einer besonderen Ladeleitung eingeschaltet.

Nach dem Systeme von Brandt werden die in den einzelnen Rängen übereinander liegenden Notlampen oder Lampengruppen von senkrecht das Gebäude durchziehenden Leitungen gespeist, die untereinander und von allen anderen Leitungen vollkommen unabhängig sind (635). Als Energiequelle kommen ausschließlich Akkumulatorenbatterien in Betracht, die geschützt im Kellergeschoß untergebracht sind. Zweckmäßig werden für diese Art der Notbeleuchtung Lampen derselben Type wie für die Hauptbeleuchtung benutzt, so daß die Notlampen teilweise an den Hauptbeleuchtungskörpern untergebracht und zur Hauptbeleuchtung selbst mit herangezogen werden können.

Beleuchtung von Eisenbahnwagen.

(736) Systeme. Die Beleuchtung erfolgt

1. lediglich durch Sammlerbatterien,
2. durch Maschinen in Verbindung mit Batterien.

Beide Arten können sowohl für Beleuchtung einzelner Wagen (Einzelwagenbeleuchtung) oder für Beleuchtung ganzer Züge von einem oder mehreren Wagen des Zuges aus (geschlossene Zugbeleuchtung) Verwendung finden.

(737) Beleuchtung durch Sammlerbatterien. Die Batterien werden für geschlossen bleibende Züge in einem oder zwei Wagen des Zuges, sonst in jedem Wagen aufgestellt. Zur Ladung werden die Batterien entweder herausgenommen und durch frisch geladene ersetzt, oder es ist besser, sie bleiben in dem Wagen und werden während des Aufenthaltes der Züge auf den Abstellbahnhöfen geladen. In letzterem Falle werden die Leitungen bis an die Gleise geführt und enden in verschließbaren Anschluß- und Schalttafeln. Bei den Wagen der italienischen und ungarischen Staatsbahnen sowie einer großen Zahl von Klein- und Nebenbahnen, ferner bei den Bahnpostwagen der Reichspost, der bayerischen und österreichischen Post werden die Batterien ausgewechselt. Die Batterien müssen deshalb möglichst leicht gebaut sein; es sind vorzugsweise positive Gitter- oder Masseplatten, aber

auch Oberflächenplatten in Verwendung. Die genannten Verwaltungen haben Einzelwagenbeleuchtung.

Geschlossene Zugbeleuchtung mit Aufladung im Wagen hat die Dänische Staatsbahn eingeführt, bei welcher 2 Wagen jedes Zuges mit Batterien ausgerüstet sind.

Einzelwagenbeleuchtung mit Aufladung im Wagen hat die Preußische Staatsbahn bei einer größeren Anzahl Wagen ausgeführt. Da es auf das Gewicht der Batterien bei Aufladung im Wagen nicht ankommt, werden positive Großoberflächenplatten für die Batterien vorgesehen.

Die Hauptvorteile der reinen Batteriebeleuchtung sind große Einfachheit der Wageneinrichtung und geringere Beschaffungskosten. Der wesentlichste Nachteil besteht in der Abhängigkeit von einer Ladestation, ein Nachteil, welcher natürlich mit der größeren Verbreitung des Systems und der dadurch bedingten größeren Anzahl von Ladestationen immer weniger ins Gewicht fällt. Mit Verwendung der Metallfadenlampen mit wesentlich geringerem Stromverbrauch kommt dieses System für allgemeine Einführung mehr in Betracht. Vor Kriegsbeginn betrug die Zahl der nur durch Batterien beleuchteten Wagen in Europa etwa 12000 gegenüber 32000 elektrisch beleuchteten Wagen in Europa überhaupt. In außereuropäischen Ländern wird die reine Batteriebeleuchtung nur sehr wenig angewandt.

(738) Maschinenbeleuchtung. a) Geschlossene Zugbeleuchtung. Die Dynamomaschine kann angetrieben werden:

1. von Dampfturbinen oder Dampfmaschinen auf der Lokomotive, oder im Gepäckwagen.
2. von Petroleummotoren im Gepäckwagen und
3. von der Wagenachse (Achsbeleuchtung).

Die geschlossene Zugbeleuchtung eignet sich für europäische Verhältnisse mit Ausnahme Rußlands infolge des dichten Bahnnetzes und der geringen Anzahl dauernd zusammen bleibender Züge wenig, dagegen ist dieselbe in den Vereinigten Staaten und in Rußland sehr verbreitet. Turbinendynamos auf der Lokomotive sind von der Preußischen Staatsbahn angewandt worden bei einer Reihe von Zügen und auch auf amerikanischen Zügen vielfach im Gebrauch. Dort wird die Aufstellung von Dynamomaschinen im Gepäckwagen mit Dampflieferung von der Lokomotive vielfach angewandt, ganz besonders auf den westlichen Bahnen. Petroleummotoren sind auf russischen Bahnen vielfach in Gebrauch. Die Batterien befinden sich entweder lediglich im Gepäckwagen, oder jeder Wagen ist mit solchen ausgerüstet.

Vorteilhafter in den Anschaffungskosten ist die Achsbeleuchtung für geschlossene Züge, welche in größerem Umfange auf europäischen Bahnen für Vorortstrecken und bei Kleinbahnen eingeführt ist, also bei solchen Zuggattungen, welche dauernd geschlossen bleiben. Die Batterien werden in der Regel nur in den mit Maschine ausgerüsteten Wagen angeordnet.

Über die verschiedenen Bauarten der Achsbeleuchtung s. unter b.

(739) b) Einzelwagenbeleuchtung. Die Maschinenbeleuchtung kann hier nur als Achsbeleuchtung Anwendung finden. Bauarten, welche am meisten eingeführt sind: Stone (Abb. 447), Brown, Boveri & Co. (Abb. 448), Dick (Abb. 449), GEZ (Gesellschaft für elektrische Zugbeleuchtung) (Abb. 450), ferner sind zu nennen: Vicarino, Grob (Julius Pintsch A.-G.) (Abb. 451) Außerdem sind in Engand noch die Bauarten der Tudor Accumulator Co. (Bauart TAC), Vickers Hall, Leitner-Lucas, Mather & Platt, in den Vereinigten Staaten von Amerika die Bauarten der Consolidated Railway Electric Lighting & Equipment Co., der United States Light and Heating Co., der Safety Car Heating and Lighting Co., der Gould Coupler Co. u. a. in Gebrauch.

Jede Achsbeleuchtung hat infolge der eigenartigen Betriebsverhältnisse eine Reihe von Apparaten nötig, bedingt durch die stets wechselnden Geschwindig-

keiten, die Änderungen in der Fahrtrichtung sowie das Fehlen jeglicher Bedienung während des Betriebes. Die Apparate sind dauernden Erschütterungen und Temperaturschwankungen bei vielfach feuchter oder staubiger Luft ausgesetzt.

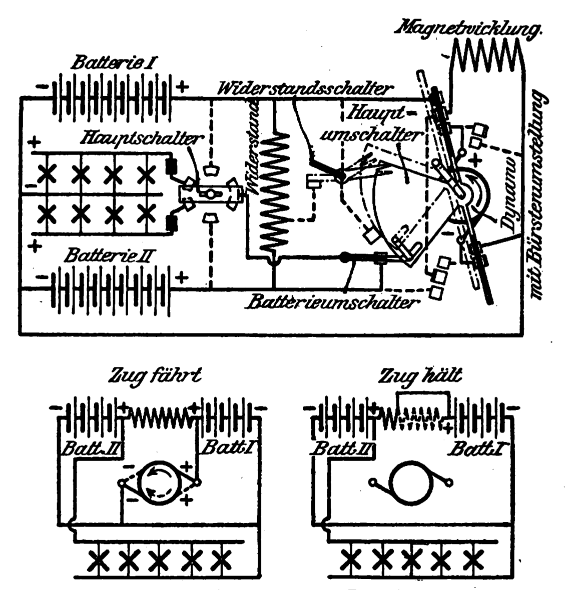


Abb. 447. Schaltungsplan für elektrische Zugbeleuchtung nach Stone.

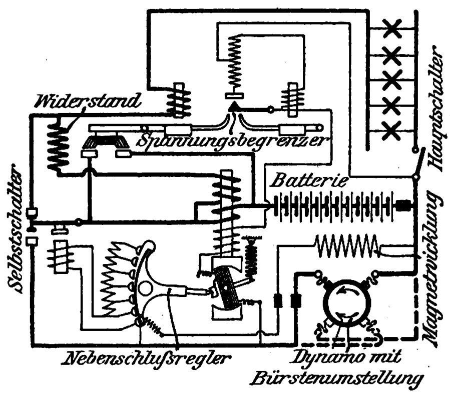


Abb. 448. Schaltungsplan für elektrische Zugbeleuchtung nach Brown, Boveri & Co.

Eine Einrichtung besteht außer Maschine, Batterie, Leitungen und Schalter im wesentlichen aus folgenden Hauptteilen:

a) dem Antrieb;
b) dem Spannungsregler für die Maschine, einer Vorrichtung, die Maschinenspannung entsprechend den Erfordernissen der Ladung der Batterie zu regeln;

c) dem Lampenregler, einer Vorrichtung, die Spannung an den Lampen stets gleichmäßig zu halten;

d) dem Selbstschalter, einer Vorrichtung, die Maschine in den Stromkreis einzuschalten, sobald deren Spannung die Spannung der Batterie erreicht oder überschritten hat;

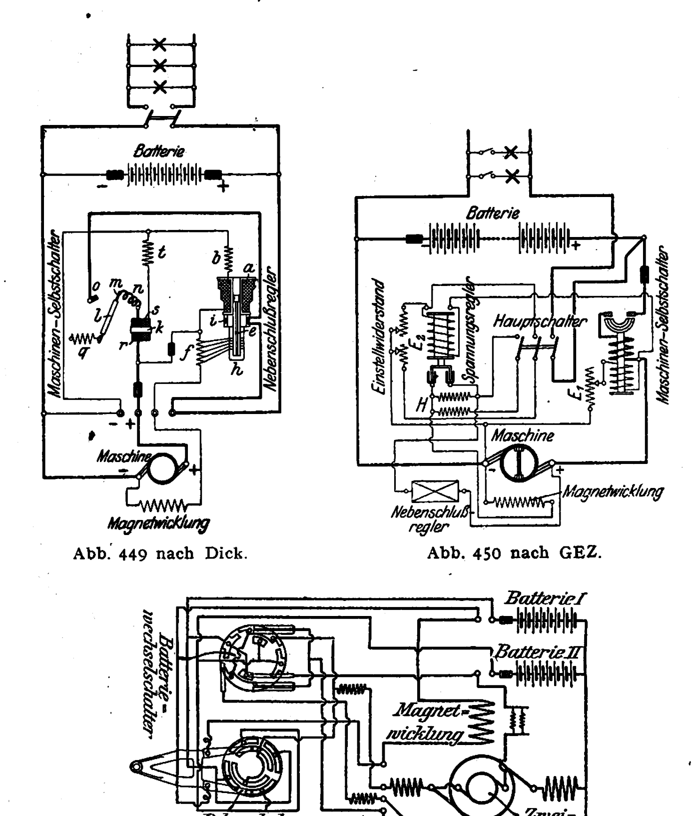


Abb. 449 nach Dick.

Abb. 450 nach GEZ.

Abb. 451. Schaltungspläne für elektrische Zugbeleuchtung nach Pintsch-Grob.

e) dem Polwechsler, einer Vorrichtung, bei Fahrtrichtungsänderung die Pole der Maschine umzuschalten;

f) einer Vorrichtung zur Verhütung der Überladung der Batterie;

zu a) als Antrieb dienen fast ausschließlich Riemen; neuerdings hat sich auch Kettenantrieb bewährt.

zu b) Zur Regelung der Maschinenspannung verwendet Stone einen nach Erreichung einer bestimmten Geschwindigkeit gleitenden Riemen, so daß die

Umdrehungszahl der Maschine bei weiterer Geschwindigkeitssteigerung konstant bleibt. Brown, Boveri & Co. und Dick verwenden selbsttätige Regelung der Nebenschlußerregung auf elektromagnetische Weise. GEZ benutzt die Rosenbergsche Maschine (418). Maschinen mit Gegenwicklung sind gleichfalls mehrfach in Gebrauch, so bei Vicarino in Frankreich, TAC (Tudor Accumulator Co.) und Vickers Hall in England. Pintsch-Grob benutzt eine Batterie zur gleichmäßigen Erregung der Maschine. Letztere hat 2 Kollektoren; der eine liefert den Lampenstrom, der andere den Ladestrom für die zweite Batterie.

zu c) Um die Spannung an den Lampen gleichmäßig zu halten, verwenden Stone, Vicarino sowie einige englische Bauarten 2 Batterien, von denen die eine im wesentlichen in Ladung, die andere in Entladung sich befindet. Umschaltung der Batterien von Ladung auf Entladung erfolgt bei Stone bei Fahrtrichtungswechsel, bei Vicarino nach bestimmten Zeitabständen, bei Grob nach jedem Aufenthalt. Dick, welcher früher 2 Batterien verwandte mit Umschalten nach jedem Aufenthalte, arbeitet gegenwärtig nur noch mit einer Batterie. Eine Batterie verwenden die übrigen genannten Bauarten sowie sämtliche amerikanischen. Es wird nach und nach mit steigender Spannung Widerstand vor den Lampenstromkreis geschaltet. GEZ hat Eisendrahtwiderstände (Nernstlampenwiderstände) verwendet, welche dauernd vor jede Lampe oder Lampengruppe geschaltet sind und alle Spannungsschwankungen aufnehmen. Dick und GEZ verwenden jetzt keine besonderen Lampenregler mehr. Die Spannung schwankt bei Dick bei einer Lampenspannung von 24 bis 27 V entsprechend einer Ladespannung von 2,25 V für jedes Element. GEZ benutzt einen Spannungsbegrenzer mit 2 Stellungen, deren erste nach Erreichung einer Spannung von 2,3—2,35 V für die Zelle Widerstand in die Erregerwicklung der Maschine schaltet und deren Leistung auf den Lampenstromverbrauch herabsetzt.

zu d) Selbstschalter. Vorzugsweise werden einfache elektromagnetische Apparate benutzt. Stone verwendet einen Fliehkraftregler, der bei bestimmter Umdrehungszahl entsprechende Kontakte schließt.

zu e) Polwechsler. Stone schaltet mittels des obengenannten Fliehkraftreglers bei Fahrtrichtungswechsel die Pole um. Vielfach werden die Dynamobürsten bei Fahrtrichtungswechsel entsprechend verschoben, so bei Vicarino, TAC, Brown, Boveri & Co. GEZ verwendet keine besondere Polwechselvorrichtung, da die Rosenbergsche Maschine stets gleichgerichteten Strom gibt.

zu f) Zur Verhütung der Überladung der Batterie verwendet GEZ sowie Brown, Boveri & Co. einen besonderen elektromagnetisch betätigten Apparat. Dick und Grob lassen die Maschine stets mit einer gleichbleibenden Spannung für Ladung der Batterien arbeiten, welche einer Spannung von 2,4—2,5 V für jedes Element entspricht. Stone hat keine besondere Vorrichtung zur Verhinderung der Überladung.

(740) Bestehende Anlagen. Reine Akkumulatorenbeleuchtung ist in Deutschland bei Bahnpostwagen, bei D-Zugwagen der Preußischen Staatsbahnen und vielen Klein- und Nebenbahnen eingeführt. Die Bahnpostwagen enthalten Batterien von 16 Zellen, zu je 4 in einen Kasten eingebaut. Kapazität etwa 96 Ah, Lade- und Entladestrom 6 A, Gewicht der ganzen Batterie 172 kg. Die zu speisenden Lampen sind einzeln ausschaltbar. Batterien werden zum Laden ausgewechselt. Bei den D-Zugwagen der Preußischen Staatsbahnen werden die Batterien von 370 Ah Inhalt im Wagen aufgeladen. Mit Maschinenbeleuchtung sind eine große Zahl Kleinbahnen ausgerüstet. Von Hauptbahnen hat die Preußische Staatsbahn Beleuchtung geschlossener D-Züge mit Gepäckwagenmaschine und Achsantrieb, eine Anzahl D-Zugwagen und ferner alle Schlafwagen mit

Achsbeleuchtung nach GEZ ausgerüstet. Eine Anzahl Bahnpostwagen ist ebenfalls mit Achsbeleuchtung nach Stone und GEZ ausgerüstet. Die Wagen der ehemaligen Pfalzbahn haben Stonesche Bauart, die Sächsische Staatsbahn die Bauart der GEZ, Grob und von Brown, Boveri & Co., die Bayerische Staatsbahn GEZ, die Dänische Staatsbahn Zugbeleuchtung mit Batterien, die Schweizer Bundesbahn Einzelwagenbeleuchtung nach Brown, Boveri & Co., die Italienische Staatsbahn Batteriebeleuchtung mit Auswechseln der Batterien, England und Kolonien Einzelwagenbeleuchtung wesentlich nach Stone, in geringerem Umfange andere Systeme wie TAC, Vickers Hall usw., russische Bahnen im wesentlichen Bauart der GEZ, Französische Bahnen Vicarino, Stone, Brown, Boveri & Co. und GEZ, Österreichische Bahnen Dick, Ungarische Bahnen GEZ, Anatolische und Bagdadbahn GEZ, Orientalische Bahn Dick. Im Jahre 1914 dürften in Europa über 32000 Wagen mit elektrischer Beleuchtung vorhanden gewesen sein, in den Vereinigten Staaten ca. 15000, in den übrigen Ländern zusammen etwa 30—40000 Wagen. In Amerika und außereuropäischen Ländern, wo Gasbeleuchtung nur wenig in Gebrauch ist, macht die elektrische Beleuchtung sehr schnell große Fortschritte. Auf dem europäischen Kontinent ist die Entwicklung durch die bestehende Gasbeleuchtung zum Teil gehemmt.

(741) Die Kosten der elektrischen Beleuchtung sind je nach Bauart und Ausstattung verschieden. Sie sind im allgemeinen bei großen Bahnnetzen höher als die der Gasbeleuchtung, bei kleineren Netzen vorteilhafter wegen der hohen Kosten der Gasanstalt. Die Betriebskosten stellen sich nur bei sehr billigem Gasbezug, wie er durch große Gasanstalten ermöglicht wird, höher als die Gasbeleuchtung.

Die Vorzüge der elektrischen Beleuchtung bestehen, abgesehen von den allgemeinen der elektrischen Beleuchtung überhaupt, insbesondere in dem absoluten Schutz vor Feuersgefahr bei Eisenbahnunfällen, der Abwesenheit jedes unangenehmen Geruches im Gegensatz zur Gasbeleuchtung, der Möglichkeit einer guten Lichtverteilung, u. a. der Anordnung von Lese-, Bett- und Tischlampen, der Möglichkeit einer guten Lüftung der Wagen durch Anbringung von Ventilatoren.

Literatur: Adolf Prasch, Die elektrische Beleuchtung der Eisenbahnzüge. Stuttgart 1901, Ferdinand Enke. — Dr. Max Büttner, Die Beleuchtung von Eisenbahn-Personenwagen mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Beleuchtung. 2. Aufl. Berlin 1912, Julius Springer. — Derselbe, Neuerungen und Fortschritte der elektrischen Zugbeleuchtung. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen 1916, S. 345. — J. Schmidt, Die elektrischen Zugbeleuchtungssysteme unter besonderer Berücksichtigung des gemischten Betriebssystems. Helios, Fachzeitschrift für Elektrotechnik 1915, S. 415; 1916, S. 145ff. — Wechmann, Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Zugbeleuchtung. Verkehrstechnische Woche 1915, S. 337. — Dr. E. Rosenberg, Elektrische Zugbeleuchtung. ZVDI 1915, S. 380. — E. Dick, Elektrische Beleuchtung von Personenwagen nach dem vereinfachten System Dick. ETZ 1914, S. 1077.

Achter Abschnitt.

Elektrische Kraftübertragung.

Allgemeines.

(742) Zweck und Vorteile der elektrischen Kraftübertragung. Die elektrische Kraftübertragung bezweckt die wirtschaftliche Fortleitung benötigter Energiemengen in technisch leicht verwertbarer Form, wenn möglich unmittelbar bis zu der anzutreibenden Arbeitsmaschine. Ihre Überlegenheit zeigt sich in der Möglichkeit der Energiefortleitung auf praktisch beliebige Entfernungen bei geringen Energieverlusten, in der Einfachheit des Betriebes nicht ortsfester Maschinen mit Hilfe beweglicher Kabel, in der Möglichkeit, große Energiemengen in Akkumulatoren aufzuspeichern und sie nach Bedarf abzugeben, in der bequemen Anwendbarkeit für die mannigfaltigsten Zwecke, wie Beleuchtung, Motorenbetrieb, chemische Zwecke, Heizung usw. Die Motoren lassen sich für Leistungen von etwa $^1/_{60}$ kW und weniger bis herauf zu 10000 kW und mehr bauen, stellen also das gegenwärtig vollkommenste Mittel der Energieteilung dar. Die besonderen Vorzüge des Elektromotors sind: Geringer Bedarf an Raum und Wartung, geringes Gewicht, geringer Preis, hoher Wirkungsgrad, Widerstandsfähigkeit gegen Staub und Schmutz, vorzügliche Regelbarkeit der Geschwindigkeit, meistens unabhängig von der Belastung usw.

Die wirtschaftliche Bedeutung der elektrischen Kraftübertragung beruht auf der Möglichkeit, in großen, günstig gelegenen Kraftwerken die erforderliche Energie für ein weit ausgedehntes Gebiet zu erzeugen und sie mit geringen Verlusten bis zum Verbrauchsorte zu leiten, also die Ausnutzung der in den Rohprodukten Kohle, Gas usw. vorhandenen Energie mit vollkommenen Mitteln zu bewirken, insbesondere die in Wasserkräften gegebenen und in Talsperren künstlich aufgespeicherten Energiemengen wirtschaftlich günstig zu verwerten.

(743) Eigenschaften der wichtigsten Stromarten. Vgl. hierüber (624) bis (641). a) Gleichstrom (421 u. f.). Da der Kommutator den Bau von Maschinen für hohe Spannungen schwierig macht, kommt der Gleichstrom nur bei nicht zu großen Entfernungen in Frage. Eine Spannung über 600 V wird selten gewählt. Eine Spannungswandlung ist nur durch sich drehende, Wartung erfordernde Umformer, deren Wirkungsgrad verhältnismäßig gering ist, möglich (554 u. f.). Gleichstromenergie läßt sich in Akkumulatoren aufspeichern, mit ihnen können die in Lichtanlagen auftretenden Tagesschwankungen der Belastung sowie die in Kraftanlagen stoßweise auftretenden Belastungsschwankungen in weitgehendem Maße ausgeglichen werden (598, 635).

Die Motoren gehen unter Last an, sie lassen sich für sehr niedrige Drehzahl bauen. Hauptschlußmotoren vertragen stärkere Überlastungen als Nebenschlußmotoren; bei ihnen geht die Drehzahl mit wachsender Belastung in weitgehendem Maße zurück (428).

b) Drehstrom (487 u. f.). Da die Generatoren und Motoren für hohe Spannungen gebaut werden können und Spannungswandlung in ruhenden, mit hohem Wirkungsgrad arbeitenden Transformatoren möglich ist, so ist der Drehstrom besonders gut zur Übertragung großer Energiemengen auf große Entfernungen geeignet.

Für Antrieb durch Dampfturbinen werden die Generatoren für sehr große Leistungen und hohe Drehzahl gebaut, größte bisher gebaute Maschinen etwa 60000 kVA bei 1000 Umdr/min und etwa 16000 kVA bei 3000 Umdr/min (Abb. 299). Höchste Generatorspannung etwa 10000 V, doch sind auch schon Maschinen für höhere Spannungen gebaut. Höchste Fernleitungsspannung etwa 150000 V, größte wirtschaftlich zu bewältigende Entfernung etwa 200 km.

Die Drehstrommotoren gehen, wenn in den Läuferstromkreis ein Anlaßwiderstand geschaltet wird, unter voller Last an, vertragen hohe Überlastung und erfordern wenig Wartung. Sie lassen sich bei der üblichen Frequenz 50 nicht für so niedrige Drehzahlen bauen wie Gleichstrommotoren.

c) Einphasiger Wechselstrom (483 u. f.). Bezüglich Ausführung der Generatoren und Motoren für hohe Spannung sowie hinsichtlich wirtschaftlicher Spannungswandlung gilt das Gleiche wie für Drehstrom. Die neueren Formen von Motoren (Repulsionsmotoren, Reihenschlußmotoren usw.) gehen unter Last an, lassen sich aber nicht für so große Leistungen ausführen wie die Drehstrom- und Gleichstrommotoren. Hinsichtlich Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Belastung verhalten sie sich ähnlich wie die Gleichstrom-Hauptschlußmotoren.

(744) Die **Leitungsanlage** zur Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie ist so zu bemessen, daß die gesamten Energiefortleitungskosten (Kosten der Energieverluste sowie Abschreibung und Verzinsung der Leitungen) möglichst gering werden, und daß bei allen vorkommenden Belastungen an den Stromverbrauchern die von ihnen benötigte Spannung herrscht. Die Unterlagen für die Berechnung der Energiefortleitungskosten sind jedoch in den meisten Fällen unsicher und ungenau, und die Möglichkeit zukünftiger Erweiterung der Anlage verlangt mindestens die gleiche Berücksichtigung, so daß von der Berechnung des sogenannten „wirtschaftlichen Querschnittes" (650), bei dem die Fortleitungskosten auf ein Mindestmaß zurückgehen, meistens abgesehen werden kann.

Über die Berechnung von Leitungen und Leitungsnetzen s. (642) bis (652), Bau der Leitungen s. (653) bis (673), Apparate, Sicherungen, Schaltanlagen s. (674) bis (692).

Regelung der Drehzahl der Motoren.

(745) Gleichstrom. Wie unter (421) bis (437) näher ausgeführt ist, erfolgt die Regelung der Drehzahl der Motoren entweder durch Änderung der Feldstärke oder durch Änderung der dem Anker zugeführten Spannung. Die in letzterem Falle am meisten angewandten Mittel sind: a) ein vor dem Anker liegender Widerstand, b) Anschluß an eine Steuerdynamo, c) Gegenschaltung, d) Mehrleiternetz.

Der Widerstand im Ankerstromkreis wird nur in untergeordneten Betrieben verwandt, sobald die mit ihm verbundenen Nachteile, Energieverlust im Widerstand und Veränderlichkeit der Geschwindigkeit bei verschiedenen Belastungen, nicht von besonderem Einfluß sind. Bei der Regelung mit Hilfe einer Steuerdynamo wird die Energie zum Betrieb des Motors in einem besonderen Generator, dessen Spannung mit Hilfe eines vor der Magnetwicklung liegenden Regelwiderstandes verändert wird, der sogenannten Steuerdynamo oder Anlaßdynamo, erzeugt. Die jeweilige Drehzahl des Motors ist dann praktisch unabhängig von seiner Belastung. Wird die Steuerdynamo durch einen an das Netz angeschlossenen Motor angetrieben, so wird die Schaltung nach dem amerikanischen Erfinder Ward Leonard als Leonardschaltung (425) bezeichnet. Sie wird in großem Umfange zur Regelung der Geschwindigkeit sehr großer Motoren (Bergwerksfördermaschinen, Umkehrwalzenstraßen), sowie in solchen Fällen, in denen eine feinstufige, von der Belastung unabhängige, Regelung verlangt wird (Aufzüge, Papiermaschinen, Krane usw.) angewandt.

Ähnlich wie die Regelung mit Steuerdynamo arbeitet die Regelung der Ankerspannung mit Gegenschaltung (433). Hierbei liegt der Anker des zu regelnden Motors mit den Ankern von 2 Gleichstromgeneratoren hintereinander in einem gemein-

samen Stromkreis. Die Ankerspannung des Motors wird zwischen Null und einem Höchstwert feinstufig dadurch geregelt, daß die Anker der beiden Generatoren bei Stillstand des Motors auf gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Spannungen eingestellt sind und zur Regelung der Motorspannung die Spannung des einen Generators von $-e_{max}$ über Null auf $+e_{max}$ mit einem vor der Magnetwicklung liegenden Umschalter und Widerstand verändert wird.

In Anlagen mit einer größeren Zahl Motoren empfiehlt sich oft die Einrichtung eines Mehrleiternetzes, etwa mit 3 oder 4 verschiedenen Spannungen, mit Hilfe dessen ohne Widerstandsregelung mehrere Ankerspannungen, etwa 6, eingestellt werden können, ein Mittel, das in amerikanischen Maschinenfabriken verschiedentlich angewandt wird (433). Bei Zuhilfenahme eines Feldregelwiderstandes läßt sich ohne ins Gewicht fallende Verluste eine weitgehende feinstufige Regelung herbeiführen (435).

(746) Drehstrom. Die Drehzahl der gewöhnlichen asynchronen Drehstrommotoren läßt sich am einfachsten mit Hilfe eines in den Läuferstromkreis geschalteten Widerstandes verändern (515, 1), ein Mittel, das trotz der mit ihm verbundenen Verluste und der Veränderlichkeit der Drehzahl bei verschiedenen Belastungen der Einfachheit und der niedrigen Anlagekosten halber häufig angewandt wird.

Auch bei großen Motoren wird es in bestimmten Fällen mit Vorteil benutzt, z. B. in Anlagen mit großen Schwungmassen, deren Energieinhalt die Motoren bei Belastungsstößen unterstützen soll (Schlupfwiderstand). Wenn das den Motor belastende Drehmoment mit sinkender Drehzahl gleichfalls abnimmt, wie bei Ventilatorantrieb, treten nur verhältnismäßig geringe Verluste im Widerstande auf.

Bei den polumschaltbaren Motoren (515,2) und den Kaskadenmotoren (516) werden zwar Widerstandsverluste vermieden, doch sind diese Motoren für die meisten Fälle zu teuer und ermöglichen auch nur die Einstellung einzelner weniger Drehzahlen, nicht aber eine feinstufige Regelung in weiten Grenzen. Beide Motoren, hauptsächlich der Kaskadenmotor, kommen für den Antrieb großer Bergwerksventilatoren vielfach in Frage.

Für eine feinstufige wirtschaftliche Regelung großer asynchroner Drehstrommotoren, z. B. bei Antrieb von großen Bergwerksventilatoren und von Walzenstraßen, kommen hauptsächlich in Frage: a) Umformung der an den Schleifringen abgenommenen Drehstromenergie in Gleichstrom zwecks Speisung eines den Hauptmotor unterstützenden Gleichstrom-Hintermotors, b) Umformung des den Schleifringen abgenommenen Drehstromes auf gleiche Spannung und Frequenz, wie das Hauptnetz besitzt, und Rückgabe dieser Energie ins Netz (516, b).

Für mittelgroße Leistungen sind die Doppelrepulsionsmotoren (Brown, Boveri & Co.), die Drehstrom-Reihenschlußmotoren (Siemens-Schuckertwerke) und die Drehstrom-Nebenschlußmotoren (Siemens-Schuckertwerke) mit Vorteil zu verwenden. Die beiden ersteren Motorarten finden Anwendung für Bergwerksfördermaschinen mittlerer Leistung, die Drehstrom-Nebenschlußmotoren u. a. für Werkzeugmaschinenantriebe. Die Drehzahl wird bei diesen 3 Motorarten mittels Bürstenverschiebung geregelt.

Sondergebiete der elektrischen Kraftübertragung.

I. Bergwerke.

(747) Hauptschachtfördermaschinen. Die Fördermaschinen zerfallen in Trommelmaschinen (konische, zylindrische, konisch-zylindrische Trommeln), Treibscheiben- oder Koepemaschinen und Bobinenmaschinen. Der Motor treibt die Arbeitswelle entweder unmittelbar oder mittels Zahnradvorgeleges an. Bei Maschinen von einigen 100 kW Motorleistung ab ist unmittelbare Kupplung unbedingt vorzuziehen. Die erforderlichen Bremsen werden durch Druckluft, Bremsgewichte, Hilfsmotoren oder Bremsmagnete betätigt. Die Vollkommenheit

der Anlage wird bedingt durch die erreichte Steuerfähigkeit und die Sicherheit gegen Überschreitung der zulässigen Fördergeschwindigkeit sowie hauptsächlich gegen Zuweitfahren der Förderschale. Sie hängt von der Ausführungsart des elektrischen Teiles ab. Dieser soll folgende Aufgaben erfüllen: Vollkommene Steuerfähigkeit und weitestgehende Sicherheit, Ausgleich der Belastungsschwankungen, soweit das Netz dies nötig macht, geringe Betriebskosten und Anlagekosten. Es kommen in Frage:

a) Antrieb durch einen gewöhnlichen asynchronen Drehstrommotor. Die Anlagekosten sind mäßig. Da die Fördergeschwindigkeit von der jeweiligen Belastung sowie davon, ob Last gehoben oder gesenkt wird, abhängt, läßt sich für größere Maschinen eine einigermaßen ausreichende Steuerfähigkeit auf rein elektrischem Wege schwer erreichen, vielmehr wird dazu zweckmäßig eine geeignet ausgebildete Regelbremse zu Hilfe genommen. Da sich der Motor bei der üblichen Frequenz von 50 nur bei sehr großen Leistungen für die geringe Drehzahl der Förderwelle bauen läßt, ist fast immer ein Zahnradvorgelege nötig. Die Stromstöße beim Anfahren sowie beim Wiedereinschalten des Motors am Schluß des Zuges, ferner beim Umsetzen einer mehrstöckigen Förderschale sind groß. Das Netz wird daher ungünstig beeinflußt. Der Energieverbrauch wird durch die Widerstandsverluste beim Anlassen sowie beim Fahren mit Gegenstrom unter Umständen sehr vergrößert. Um diesen auch von der Bewegungsenergie der Massen abhängigen Verlust soweit wie möglich zu vermindern, ist die Fördergeschwindigkeit nicht zu groß zu nehmen. Für Anlagen mit geringer Schachtteufe und großer stündlicher Zügezahl ist der Antrieb durch einen asynchronen Drehstrommotor ungünstig. Allgemein läßt sich nur bei kleinen und mittelgroßen Fördermaschinen eine ausreichende Wirtschaftlichkeit und Steuerfähigkeit mit ihm erreichen.

b) Antrieb durch Wechselstrom-Repulsionsmotor oder Drehstrom-Reihenschlußmotor. Die Grenze, für die die Motoren sich noch bauen lassen, liegt ungefähr bei einer mittleren Leistung von 300 bis 400 kW. — Hinsichtlich der Schwierigkeit der unmittelbaren Kupplung gilt das unter a) Gesagte. Da die Regelung lediglich durch Bürstenverschiebung erfolgt, werden Widerstandsverluste vermieden, und der Energieverbrauch steigt beim Anlassen allmählich an. Wird beim Verzögern vor den Ständer ein Widerstand gelegt, der so groß ist, daß Erregung des Ständers vom Netz aus vermieden wird, so ist es möglich, nutzbareEnergie ins Netz zu geben und elektrisch abzubremsen. Auch hinsichtlich der Wirkung auf das Netz beim Einschalten und Anlassen sowie hinsichtlich des Energieverbrauches sind beide Motoren günstiger als der asynchrone Drehstrommotor. Ihre Nachteile sind hauptsächlich die große Kraftanstrengung zum Verschieben der Bürsten, der hohe Bürstenverschleiß und die hohen Anschaffungskosten.

c) Antrieb durch Gleichstrommotor im Anschluß an eineSteuerdynamo. Die Geschwindigkeit ist praktisch von der Belastung unabhängig und allein abhängig von der Stellung des Steuerhebels, der den im Magnetstromkreis der Steuerdynamo liegenden Widerstand ein- und ausschaltet. Daher läßt sich ein sehr einfacher und sehr zuverlässig wirkender Sicherheitsapparat ausbilden, und die Steuerfähigkeit ist die denkbar günstigste. Da der Gleichstrommotor sich für niedrige Drehzahlen bauen läßt, ist in allen Fällen, in denen die Größe der Maschine es wünschenswert macht, unmittelbare Kupplung zwischen Motor und Fördermaschinenwelle möglich. Der Energieverbrauch der Steuerdynamo entspricht annähernd der Fördergeschwindigkeit, so daß die Belastungsweise des die Steuerdynamo antreibenden Drehstrommotors verhältnismäßig günstig ist. Verluste in den Widerständen treten in verschwindend geringem Umfange auf. Die den Strom für den Fördermotor liefernde Steuerdynamo wird unmittelbar durch eine Dampfmsachine oder eine Dampfturbine oder durch einen Elektromotor, meistens einen Drehstrommotor angetrieben. Bei unmittelbarem

Antrieb durch eine Dampfturbine, der jedoch nur bei geringer Entfernung zwischen Kraftwerk und Förderanlage möglich ist, ist mit der Dampfturbine noch ein Drehstromgenerator für die übrigen Betriebe zwecks Schaffung einer Grundbelastung zu verbinden.

Bei Antrieb der Steuerdynamo durch einen Drehstrommotor wird, wenn das Kraftwerk im Verhältnis zum Energieverbrauch der Fördermaschine zu klein ist, ein Belastungsausgleich vorgesehen, und zwar entweder in Form eines Schwungrades oder einer Akkumulatorenbatterie. Da ein Schwungrad keinerlei Wartung bedarf, wenig Raum einnimmt, auch keinen schlechteren Gesamtwirkungsgrad der Anlage ergibt als eine Batterie, wird in der Regel ein Schwungrad genommen (Ilgner, ETZ 1902, S. 961; vgl. Abb. 317). In Verbindung mit großen modernen Dampfturbinenkraftwerken ergibt sich im Jahresdurchschnitt ein wesentlich geringerer Dampfverbrauch für die effektive Schacht-kWh als selbst bei den besten Dampffördermaschinen.

(748) Ventilatoren. Wichtig sind hauptsächlich die großen Hauptschachtventilatoren zum Bewettern ganzer Gruben. Sie werden bei größeren Leistungen unmittelbar mit dem antreibenden Motor, fast immer einem Drehstrommotor, gekuppelt. Der Umstand, daß der Bedarf einer Grube an frischen Wettern mit ihrer Ausdehnung wächst, bringt oft die Notwendigkeit einer Regelung der Motordrehzahl mit sich. Sie kann mit Hilfe eines in den Läuferstromkreis geschalteten Regelungswiderstandes (515) oder durch Ausbildung des Drehstrommotors als Kaskadenmotor (516) oder mit Hilfe eines an die Schleifringe des Läufers angeschlossenen Regelumformers (540) bewirkt werden. Ein Regelwiderstand ist am billigsten. Da beim Ventilator das erforderliche Drehmoment mit dem Quadrat der Drehzahl abnimmt, so nimmt bei Regelung mit einem solchen Widerstand auch der Energieverbrauch mit dem Quadrat der Drehzahl ab, während die Motorleistung mit der dritten Potenz der Drehzahl sinkt, die Verluste im Widerstand sind also verhältnismäßig gering. Dennoch sind die gesamten Jahresverluste unter Umständen erheblich, weil ein Hauptschachtventilator Tag und Nacht durchlaufen muß. Bei einem Kaskadenmotor, bei dem vorteilhaft der Sekundärmotor polumschaltbar gemacht wird, lassen sich mehrere Drehzahlen einstellen, eine ununterbrochene Regelung ist aber nicht möglich. Bei Verwendung eines Regelumformers im Läuferstromkreis wird die an den Schleifringen abgenommene Regelenergie im Umformer entweder in Gleichstrom umgewandelt und einem auf der Welle des Hauptmotors sitzenden Hintermotor zugeführt, oder in Drehstrom von gleicher Frequenz und gleicher Spannung, wie der Netzstrom besitzt, umgeformt und ins Netz zurückgegeben.

(749) Wasserhaltungen. Für die Wasserhaltungen werden Kolbenpumpen oder Schleuderpumpen genommen und beide fast immer unmittelbar mit den Motoren gekuppelt. Kolbenpumpen haben besseren Wirkungsgrad als Schleuderpumpen, sind aber wesentlich teurer und erfordern mehr Raum und Wartung. Für Hängepumpen, die beim Abteufen und Sümpfen von Schächten nötig sind, werden nur Schleuderpumpen, angetrieben durch vollkommen gekapselte Drehstrommotoren, deren Gehäuse durch Wasser gekühlt ist, genommen. Die üblichen Drehzahlen der Schleuderpumpen sind 1500 Umdr/min und bei großer Förderhöhe und verhältnismäßig geringer Wassermenge 3000 Umdr/min. Die Kolbenpumpen arbeiten mit etwa 100 bis 150 Umdr/min. Eine Regelung der Drehzahl ist bei Wasserhaltungen nicht erforderlich. Für die ortsfesten Wasserhaltungen können offene oder ventiliert gekapselte Motoren genommen werden. Bei der letzteren Ausführungsform wird die Kühlluft vielfach mit Hilfe sogenannter Lutten, das sind Rohrleitungen aus dünnwandigem Eisenblech von großem Durchmesser, aus einem Nachbarraum mit genügend kühler Luft angesaugt. Der Maschinenraum der Wasserhaltungen ist gegen Überflutung durch Ansteigen des Wassers soweit wie möglich zu schützen.

(750) Bohrmaschinen. In Frage kommen für weiches Gestein, wie Kali, Minette, Kohle usw. Drehbohrmaschinen, für hartes Gestein Stoßbohrmaschinen. Der antreibende Motor, fast immer ein Drehstrommotor mit Kurzschlußanker, wird in der Regel unmittelbar an die Bohrmaschine angebaut. Bei den Drehbohrmaschinen wird häufig in das Getriebe zwischen Motor und Bohrer eine Reibungskupplung eingebaut, die bewirkt, daß der Bohrervorschub mit der Härte des Gesteins selbsttätig sinkt und steigt. Von den Stoßbohrmaschinen ist hauptsächlich diejenige mit Federhammer zu erwähnen, bei der der Bohrer durch hin- und hergehende Doppelfedern mit der vom Motor angetriebenen Welle verbunden ist. Ein mittels Gleitkupplung mit dem Bohrgetriebe verbundenes Schwungrad bewirkt annähernd gleichmäßige Beanspruchung des Motors und begrenzt die Beanspruchung des Getriebes, so daß die Abnutzung der einzelnen Teile auf ein geringes Maß herabgedrückt wird. Die Vorteile der elektrisch angetriebenen Stoßbohrmaschine gegenüber der Preßluftmaschine sind der geringe Energieverbrauch, der nur etwa gleich dem zehnten Teil desjenigen beim Preßluftbetrieb ist, die Unabhängigkeit des Energieverbrauchs vom Verschleiß und die durch die Feder gegebene große Rückzugskraft des Bohrers.

Elektrische Bohrhämmer haben sich bisher nicht bewährt. Es ist noch nicht möglich gewesen, ihr Gewicht so gering zu halten, daß sie bei genügender Leistungsfähigkeit bequem in der Hand gehalten werden und mit dem verhältnismäßig leichten Preßlufthammer in Wettbewerb treten können.

(751) Grubenbahnen. Zum Betrieb der Grubenlokomotiven können sowohl Gleichstrom- wie auch Wechselstrommotoren genommen werden. Die Verwendung der ersteren bildet die Regel. Wechselstrommotoren, und zwar Reihenschluß- sowohl wie Repulsionsmotoren, sind vor mehreren Jahren eingeführt worden, um die sich drehenden, Wartung erfordernden Umformer zu vermeiden, die bei Gleichstrom-Grubenbahnen zum Anschluß an das Drehstromnetz nötig sind, und dadurch die Anlage- und Betriebskosten herabzudrücken. Die mit Wechselstrom ausgeführten Grubenbahnen haben sich betriebstechnisch gut bewährt, jedoch ist in Anlage- und Betriebskosten eine Ersparnis nicht eingetreten. Andererseits haben sie weit mehr tödliche Unfälle durch Berührung der Kontaktleitungen herbeigeführt, weil Wechselstrom für den menschlichen Organismus gefährlicher ist als Gleichstrom. Auch macht die Wartung der Wechselstrom-Kommutatormotoren größere Schwierigkeiten als diejenige der Gleichstrom-Kommutatormotoren. Wenn zur Verringerung der Berührungsgefahr die Kontaktleitung so hoch gelegt wird, daß zufällige Berührung wenig zu befürchten ist, werden die Anlagekosten wegen der Vergrößerung des Streckenprofils zu hoch. Für Neuanlagen kommt daher Wechselstrom kaum noch in Frage.

Bei Gleichstromanlagen wird der dem Netz entnommene Drehstrom in Einankerumformern oder Quecksilbergleichrichtern in Gleichstrom umgeformt. Die übliche Spannung beträgt 220—300 V, der Strom wird den Lokomotiven durch einpolige Oberleitung zugeführt und durch die Schienen zum Umformer zurückgeleitet. Eine Ausnahme hiervon kommt nur für Kalibergwerke in Frage, in denen das auf die Schienen fallende Salz den Berührungswiderstand zwischen Rad und Schiene leicht so sehr erhöht, daß ein einwandfreier Betrieb nicht aufrecht zu erhalten ist, weshalb hierfür doppelpolige Oberleitung besser ist. In Anlagen mit Schienenrückleitung ist besonders auf Gruben, auf denen mit Hilfe des elektrischen Stromes geschossen wird, die Sprengpatronen also elektrisch gezündet werden, für gute Instandhaltung der Schienenverbinder Sorge zu tragen, um Streuströme, die den Schießbetrieb leicht stören, nach Möglichkeit zu verringern. Die Lokomotiven sind den engen zur Verfügung stehenden Räumen durch enge Bauart anzupassen und zur Erzielung ausreichender Anzugskraft auch bei den unvermeidlichen Überlastungen reichlich schwer auszuführen.

(752) Anlagen in schlagwettergefährlichen Grubenräumen. Jede elektrische Anlage mit Ausnahme der Grubenbahnen mit Oberleitung läßt sich so ausführen,

daß eine Gefahr der Entzündung durch Schlagwetter, so lange die Anlage gut gewartet und instandgehalten wird, nicht besteht. Dazu gehört der Schutz der einzelnen Teile, insbesondere der Apparate und der beweglichen Leitungen, gegen mechanische Beschädigungen. Bei nichtortsfesten Maschinen z. B. den Bohr- und Schrämmaschinen, die in der Regel von nichtsachverständigen Leuten bedient werden, ebenso bei den kleinen in der Nähe des Abbaues stehenden Hilfsförderhaspeln, Separatventilatoren, Zubringerpumpen usw. ist es aber schwer, dieser Forderung zu entsprechen, weshalb für solche Anlagen in stark schlagwettergefährlichen Grubenräumen in der Regel auf den elektrischen Antrieb verzichtet wird. Anlagen mit günstigeren Betriebsbedingungen, bei denen mit guter Wartung gerechnet werden kann, sind nach den „Vorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen" des VDE auszuführen.

(753) Sonstige Betriebe in Bergwerken. Außer bei den angegebenen Maschinen wird der elektromotorische Antrieb unter Tage noch für Schüttelrutschen, kleine Hilfsförderhaspel, Förderungen mit endloser Kette oder Seil, Zubringerpumpen, Separatventilatoren, sowie über Tage zum Betrieb der Kohleseparationen, Kohlenwäschen, Kompressoren, Erzaufbereitungen, Salzmühlen, Werkstätten usw. benutzt. In den meisten Fällen handelt es sich dabei, was den elektrischen Antrieb angeht, um einfache motorische Anlagen ohne Sonderbedingungen, so daß ein näheres Eingehen auf sie nicht erforderlich ist.

II. Hütten- und Walzwerke.

(754) Ausführung der Kraftwerke. Die Kraftwerke werden in der Regel im Anschluß an Hochöfen errichtet, um die im Hochofengas enthaltene Energie nutzbar zu machen. 1 kg im Hochofen verhütteter Koks liefert etwa 4,5 m³ Gas. Der Eigenverbrauch eines Ofens für Winderhitzung, Betrieb der Gebläsemaschinen usw. beträgt zuzüglich der Undichtigkeitsverluste etwa 60%, so daß etwa 40% zur Erzeugung von Strom frei werden[1]). Zum Betrieb der Generatoren des Kraftwerkes werden sowohl Großgasmaschinen wie auch Dampfturbinen aufgestellt. Erstere verbrauchen für 1 kW indizierter Gasmaschinenleistung bei voller Belastung etwa 4 m³ Hochofengas, letztere etwa das doppelte. Da der Gasverbrauch der Großgasmaschinen mit sinkender Belastung nur wenig abnimmt, stellt sich im Jahresmittel der Vergleich für die Dampfturbinen günstiger, und zwar ergibt sich bei Verfeuerung der Gase unterm Kessel und Benutzung großer Dampfturbinen nur ein um etwa 50 bis 60% größerer Gasverbrauch als bei Verbrennung der Gase unmittelbar in den Gasmaschinen[2]). Letztere bedingen höhere Ausgaben für Schmier- und Putzmaterial, Wartung und Reparaturen sowie höhere Anschaffungskosten der gesamten Anlage. Trotzdem ergeben sie in der Regel geringere Selbstkosten für die kWh, sobald das verbrauchte Gas seinem Verbrennungswert und dem ortsüblichen Kohlenpreis entsprechend bewertet wird. Betriebstechnisch vorteilhaft ist die gleichzeitige Verwendung von Gasmaschinen und Dampfturbinen, wobei letztere die Energie für die Belastungsspitzen liefern. Wärmeverbrauch der Gasmaschinen des Kraftwerks des Georg-Marien-Bergwerks- und Hüttenvereins bei Osnabrück angegeben zu 4400 kcal/kWh bei 76% Belastung. Unter Einrechnung aller Unkosten stellte sich 1 kWh auf großen Hüttenkraftwerken vor dem Kriege auf etwa 3 bis 5 Pfennig.

Es kommen sowohl Drehstrom wie auch Gleichstrom in Frage. Der letztere hat wichtige betriebstechnische Vorteile, wie die leichte Reglungsfähigkeit der Motoren usw., macht aber bei der großen Ausdehnung neuzeitlicher Hüttenwerke

---

[1]) Vgl. Langer, Die Maschinenanlage auf modernen Hüttenwerken, Stahl und Eisen, 20. 4. 1910.

[2]) Vgl. E. Riecke, Wärmeverbrauch von Gas- und Turbodynamos in Hüttenzentralen, Stahl und Eisen, 27. 11. 1907.

Schwierigkeiten hinsichtlich der wirtschaftlichen Fortleitung der Energie. Daher wird bei großen Werken in der Regel Drehstrom von 3 bis 10 kV genommen.

(755) Walzenstraßen. a) Stets in gleicher Richtung umlaufende Walzenstraßen. Soll die Straße dauernd mit der gleichen Grundgeschwindigkeit laufen, so eignen sich der Drehstrommotor und der Gleichstrommotor annähernd gleich gut. Der letztere wird, um die Schwungmassen richtig zur Arbeitsleistung heranzuziehen und selbsttätig den dazu nötigen Abfall der Drehzahl zu geben, als Doppelschlußmotor ausgeführt, während beim Drehstrommotor der nötige Abfall der Drehzahl durch einen Schlupfwiderstand herbeigeführt wird. Soll die Straße mit verschiedenen Grunddrehzahlen laufen, so ist der Gleichstrommotor dem Drehstrommotor gegenüber nennenswert im Vorteil, da sich die verschiedenen Drehzahlen bequem durch Änderung der Feldstärke einstellen lassen. Beim Drehstrommotor werden sie am besten mit Hilfe eines Regelumformers, der die in den Schleifringen abgenommene Energie wieder nutzbar macht (540), eingestellt.

b) Umkehrstraßen (Vorblockstraßen, Grobblechstraßen, Schienen- und Trägerstraßen). Da der Motor in der Minute 15 bis 20mal umgesteuert werden muß, läßt sich nur ein Gleichstrommotor in Verbindung mit einer Steuerdynamo (425) benutzen. Zum Ausgleich der sehr erheblichen Belastungsschwankungen ist der dabei nötige Zwischenumformer mit Schwungrad auszurüsten (nach Ilgner [747, c] Abb. 317). Der Energieverbrauch einer Walzenstraße und damit auch die erforderliche Größe des Antriebsmotors hängen in erster Linie von dem Gesamtgewicht des stündlich zu verwalzenden Eisens und der dabei erzielten Verlängerung ab. Jeder Eisensorte entspricht bei einem bestimmten Gewicht des Walzgutes und einer bestimmten Verlängerung eine gewisse erforderliche Arbeit, die allerdings auch von der Temperatur des Walzgutes, der Kaliberabstufung, dem Durchmesser der Walzen sowie der Walzgeschwindigkeit abhängt. Erfahrungszahlen hierüber sind in der einschlägigen Literatur veröffentlicht[1]). Der Wirkungsgrad zwischen den Klemmen des Umformermotors und den Walzen beläuft sich je nach der Belastung und der Größe der Anlage auf etwa 50—70%.

Der wirtschaftliche Vorteil des elektrischen Antriebes der Walzenstraßen, insbesondere der großen Umkehrstraßen, gegenüber Antrieb durch Dampfmaschinen liegt in dem sehr geringen Verbrauch an Brennmaterial, der sich im Jahresdurchschnitt für die t Walzgut ergibt, in der Vergrößerung der Jahresleistung des Kraftwerkes und der dadurch verursachten Erniedrigung der Erzeugungskosten der elektrischen Energie, in der Einfachheit und Sicherheit der Bedienung, in der durch die vollkommene Steuerfähigkeit des Motors gegebenen Möglichkeit der Erzielung größerer Jahresleistungen, in der Möglichkeit, den Energieverbrauch und damit auch den Zustand der Anlage dauernd zu überwachen usw.[2]).

(756) Rollgänge. Man unterscheidet Arbeitsrollgänge und Transportrollgänge. Die ersteren werden zur Bedienung der Umkehrstraßen benutzt und müssen in ein paar Sekunden umgesteuert werden können. Letztere laufen dauernd in gleicher Richtung und stellen an den Antriebsmotor und die Steuerapparate geringere Anforderungen. Zum Antrieb werden Gleichstrom-Hauptschlußmotoren oder Drehstrommotoren mit Schleifringanlasser verwandt. Der

[1]) Vgl. Puppe, Versuche zur Ermittelung des Kraftbedarfes in Walzwerken, Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1909. — Puppe, Neuere Forschungsergebnisse auf walztechnischem Gebiete, Vortrag, gehalten auf dem Internationalen Kongreß für Bergbau usw., Düsseldorf 1910. Verlag Julius Springer, Berlin. — Puppe, Beitrag zur Kenntnis des Kraftbedarfs von Träger-, Draht- und Blechstraßen, Stahl und Eisen 1912, S. 6. — Versuche an dem elektrisch angetriebenen Blockwalzwerk der Julienhütte O.-Schl., Stahl und Eisen 1913, S. 825. — Untersuchungen im Auftrage des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute über verdrängtes Volumen und Walzarbeit, Stahl und Eisen 1914, S. 1545.

[2]) Einzelheiten bemerkenswerter ausgeführter Anlagen sind unter anderem enthalten in folgenden Veröffentlichungen: Th. Wendt, Die elektrisch betriebenen Umkehrwalzenstraßen in Georgsmarienhütte, Stahl und Eisen 1908, Seite 577. — G. Meyer, Die elektrisch betriebene Umkehrblockstraße der Rheinischen Stahlwerke, Stahl und Eisen 1909, Heft 23.

Gleichstrommotor erlaubt wegen der geringeren Eigenmassen ein rascheres Umsteuern. Der Antrieb der Rollen erfolgt mit mehrfacher Zahnradübersetzung. Die Motoren müssen in allen Teilen sehr kräftig gebaut und gut gegen Staub und Schmutz geschützt sein. Da die gewöhnlichen Motoren diesen Bedingungen nicht genügen, sind besondere „Rollgangsmotoren", Kranmotoren, von den Elektrizitätsfirmen ausgebildet worden.

(757) Hochofenaufzüge. Die Größe der zu fördernden Lasten und der erforderlichen Geschwindigkeiten bedingt, daß der Antrieb ähnlich wie derjenige von Bergwerksfördermaschinen auszubilden ist. Da ähnlich wie bei diesen ein genaues Einfahren auf die richtige Höhe, nämlich die Höhe der Gichtbühne, nötig ist, gestaltet sich der Antrieb am vollkommensten bei Verwendung eines Gleichstrommotors in Verbindung mit einer Steuerdynamo (425), doch läßt sich auch ein Gleichstrommotor in Verbindung mit einem gewöhnlichen Ankeranlasser verwenden, nur daß alsdann, besonders bei veränderlicher Belastung, größere Aufmerksamkeit seitens des Führers notwendig wird.

(758) Sonstige Hüttenwerksmaschinen. In Frage kommen außer den angegebenen wichtigsten Maschinen auf Hüttenwerken noch eine größere Zahl von Transportmaschinen sowie Maschinen zur Adjustage, d. h. zur Fertigbearbeitung der aus den Walzenstraßen kommenden Erzeugnisse. Der elektrische Antrieb der Transportmaschinen ist nach den unter (759) bis (763) dargelegten Gesichtspunkten auszuführen. In der Regel handelt es sich um stark beanspruchte Maschinen, weshalb der elektrische Teil besonders kräftig und reichlich sowie widerstandsfähig gegen Staub und Schmutz auszuführen ist. Bei den Maschinen zur weiteren Verarbeitung der Erzeugnisse der Walzenstraßen, wie den Scheren, Warmsägen, Lochmaschinen, Blechbiegemaschinen usw. werden an den elektrischen Antrieb, der hier, ebenso wie bei den Transportmaschinen, fast in allen Fällen selbstverständlich geworden ist, keine besonderen Forderungen gestellt, höchstens ist es bei schweren, mit Schwungmassen ausgerüsteten Scheren usw. nötig, ähnlich wie bei den ständig durchlaufenden Walzenstraßen, für richtigen Abfall der Drehzahl Sorge zu tragen.

III. Hebezeuge.

(759) Wahl der Stromart. Da in den meisten Fällen Motoren für Gleichstrom, Drehstrom und neuerdings auch für einphasigen Wechselstrom ohne weiteres zum Antrieb der Hebezeuge benutzt werden können, wird in der Regel die zur Verfügung stehende Stromart unmittelbar verwandt. Am brauchbarsten ist der Gleichstrommotor. Zum Antrieb von Kranen wird, sobald Gleichstrom zur Verfügung steht, stets ein Gleichstrom-Hauptschlußmotor genommen, dessen Vorzüge (hohes Anfahrmoment und hohe Überlastbarkeit, Sinken der Drehzahl bei starker und Steigen bei schwacher Belastung, sowie geringe Eigenbewegungsenergie des Ankers) ihn für den Antrieb von Kranen jeder Art zum vollkommensten Motor machen. Dagegen sind zum Antrieb von Aufzügen Nebenschlußmotoren vorzuziehen, da sie mit annähernd gleichmäßiger Drehzahl bei veränderlicher Belastung arbeiten und bei niedergehender Last nicht durchgehen, sondern Energie ins Netz zurückgeben. Für angestrengte Betriebe wird bei großen Leistungen, z. B. bei großen Wagenkippern, angestrengt arbeitenden großen Aufzügen (Warenhausaufzüge), mit Vorteil die Regelung durch Steuerdynamo (425) verwandt, die bei jeder, auch negativer, Belastung sehr genaues Fahren und Bremsen durch Energierückgabe ermöglicht. Der Drehstrommotor, der in seinen Betriebseigenschaften dem Gleichstrom-Nebenschlußmotor gleicht, ist für Antrieb von Hebezeugen jeder Art auch geeignet, aber in vielen Fällen weniger als der Gleichstrommotor. Sein Anfahrmoment und seine Überlastbarkeit reichen für Hebezeugbetrieb vollkommen aus, von Nachteil ist aber, insbesondere für Kranbetrieb, daß seine Drehzahl bei schweren Lasten nur wenig abnimmt, so daß alsdann die ver-

brauchte Leistung diejenige von Gleichstrom-Hauptschlußmotoren übersteigt. Die Vorteile der Regelung durch Steuerdynamo sind mit ihm nicht zu erzielen.

Der einphasige Wechselstrommotor wird als Reihenschluß-Wechselstrommotor oder als Repulsionsmotor verwandt und gleicht alsdann in seinen Betriebseigenschaften dem Gleichstrom-Hauptschlußmotor. Bei Aufzugsbetrieb muß der Läufer nach Erreichung der vollen Drehzahl selbsttätig kurzgeschlossen werden, so daß er mit unveränderter Drehzahl weiterläuft.

(760) Bestimmung der Motorgröße. Die Motorgröße wird nicht nur nach der größten vorkommenden Belastung, sondern auch nach der Dauer der Belastung und der Pause bestimmt, da auch hiervon die Erwärmung des Motors abhängt[1]). Es werden besondere Motoren für aussetzenden Betrieb genommen. Als normale Leistung dieser Motoren ist in den Normalien des VDE diejenige festgesetzt, die der Motor ohne Unterbrechung eine Stunde lang abgeben kann, ohne daß seine Erwärmung das zulässige Maß überschreitet. Zur Erleichterung der Wahl der richtigen Motorgröße teilt man zweckmäßig die Betriebe wie folgt ein: Schwache Betriebe: Die höchste Belastung kommt nur selten vor, wie z. B. bei Motoren wenig benutzter Laufkrane oder Hebezeuge, Drehbrücken, selten benutzter Aufzüge usw. Die Motoren dürfen so bemessen werden, daß die verlangte Höchstleistung etwa dreiviertel Stunden lang ausgehalten werden kann. Normale Betriebe: Die höchste Belastung kommt häufig vor, die Pausen sind etwa doppelt so lang wie die Arbeitsspiele. Hierher gehören die Werkstattkrane stark beschäftigter Werkstätten, Gießereien usw., Aufzüge in Mietshäusern usw. Die höchste Belastung muß etwa eine Stunde lang ausgehalten werden können. Schwere und angestrengte Betriebe: Die höchste Belastung wird in flottem Betrieb bei jedem Zug gefordert, wie bei Greiferkranen, Hebezeugen an Kohlenladeplätzen, Kranen in Stahlwerken, Rollgängen, Warenhausaufzügen usw. Die höchste Belastung muß wenigstens $1\frac{1}{2}$ Stunden lang ausgehalten werden können. Es ist bei solchen Betrieben auch vorteilhaft, langsam laufende Motoren zu nehmen, um Motoren mit geringer Eigenbewegungsenergie, also hoher Steuerfähigkeit, zu erhalten.

(761) Krane. a) Einteilung der Krane. Man unterscheidet Krane mit geradliniger Fortbewegung, wie Laufkrane, Bockkrane, Velozipedkrane, feststehende drehbare Krane, wie Werkstatt- und Werftdrehkrane, und fahrbare Drehkrane, wie Portaldrehkrane für Häfen, Drehkrane auf Lagerplätzen zum Verteilen der Kohlen usw. Die Ausbildung des elektrischen Antriebes hängt von der Arbeitsweise der Krane ab, gleicht sich aber in wesentlichen Punkten für alle Krane. Bei Laufkranen unterscheidet man Einmotoren- und Mehrmotorenkrane, je nachdem für die in Frage kommenden Bewegungen ein einziger Motor oder mehrere Motoren, je einer für jede Bewegung, genommen werden.

b) Ausbildung der Motoren, der Bremsen und der Steuerapparate. In trockenen, staubfreien Räumen sind offene Motoren zulässig, doch werden, um einheitliche Typen für alle vorkommenden Fälle zu haben, neuerdings in der Regel ganz gekapselte Motoren genommen, die zwecks bequemer Zugänglichkeit des Kommutators, der Bürsten usw. zweiteilig gemacht werden. Allseitig gedrungener Bau zur Erreichung geringsten Raumbedarfes ist gleichfalls erforderlich. Bei Drehstrommotoren ist der Luftzwischenraum zwischen Ständer und Läufer größer zu machen als bei gewöhnlichen Motoren, und die Lager sind in ihren Abmessungen reichlich zu halten, um zu vermeiden, daß der Läufer bei den unvermeidlichen Erschütterungen des Motors am Ständer schleift.

Je nachdem die Bremsen den Zweck haben, die in Bewegung befindlichen Teile zum Stillstand zu bringen und nach dem Anhalten den Zustand der Ruhe zu

[1]) Vgl. Oelschläger, ETZ 1900.



sichern oder die niedergehende Last abzubremsen und die Senkgeschwindigkeit zu regeln, unterscheidet man Stopp- oder Haltebremsen und Senkbremsen. Die stets erforderlichen Stopp- oder Haltebremsen wirken am zweckmäßigsten an derjenigen Stelle, an der das kleinste Drehmoment vorhanden ist, also z. B. bei Kranausrüstungen mit raschlaufenden Motoren auf die Motorwelle oder die Welle des ersten Vorgeleges. Um zu bewirken, daß bei ausgeschaltetem Motor die Bremse stets angezogen ist, werden die Bremsen in der Regel mit einem Bremsmagnet verbunden, der das Bremsgewicht lüftet, und der mit dem Motor ein- und ausgeschaltet wird. Die Senkbremsen haben den Zweck, die niedergehende Last abzubremsen. Da sie aber einen nicht unerheblichen Energieverbrauch mit sich bringen und der Abnutzung stark unterworfen sind, werden sie gegenwärtig fast stets ersetzt durch besondere Senkbremsschaltungen, die es ermöglichen, rein elektrisch abzubremsen, wobei der Motor entweder auf Widerstand arbeitet oder Energie ins Netz zurückgibt. Beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor wird der Anker über einen Widerstand kurzgeschlossen und die Magnetwicklung so geschaltet, daß sie im gleichen Sinne wie beim Lastheben erregt ist. Zur sicheren Einleitung der Generatorwirkung wird an den ersten Senkstufen die Magnetwicklung unmittelbar ans Netz gelegt. Durch allmähliches Verringern des Regelwiderstandes kann die Senkgeschwindigkeit in weitgehendem Maße vermindert werden. Den Drehstrommotor kann man beim Senken entweder mit etwas übersynchroner Geschwindigkeit als Generator aufs Netz arbeiten lassen oder nach Umschalten von 2 Ständerzuleitungen mittels Gegenstromes allmählich bis annähernd auf Null abbremsen. Die Energie der niedergehenden Last und die gesamte Bewegungsenergie werden dabei im Widerstand vernichtet.

Der Apparat, mit dessen Hilfe die verschiedenen Schaltungen ausgeführt werden, der Steuerapparat oder die Schaltwalze, braucht nicht unmittelbar am Motor Aufstellung zu finden, sondern kann an beliebiger Stelle aufgestellt werden. Der Platz kann so gewählt werden, daß der Kranführer das Auf- und Niedergehen des Arbeitsstückes gut übersieht. Darin liegt ein wesentlicher Vorzug des elektrischen Antriebes von Kranen, der z. B. in Stahlwerken von großem Werte ist. Der Steuerapparat besteht aus dem eigentlichen Kontaktapparat und dem Widerstand, der getrennt von ihm aufgestellt wird. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Regelungswiderständen stehen die Kontaktfinger im Kontaktapparat fest, während die auf einer Walze befestigten Gleitstücke unter ihm hin- und hergedreht werden. Das erleichtert sehr die Ausführung der verschiedenen Schaltungen, die für den Kranbetrieb nötig sind. Um die Zahl der Kontakte gering halten zu können, wird stets eine kräftige magnetische Funkenlöschung an allen Kontakten vorgesehen, die zu der großen Widerstandsfähigkeit solcher Apparate erheblich beiträgt.

(762) Aufzüge. Aufzugmaschinen werden durch Gleichstrom-Nebenschlußmotoren oder durch Drehstrommotoren, je nachdem die eine oder die andere Stromart zur Verfügung steht, angetrieben. Da Netze mit einphasigem Wechselstrom selten sind, kommen einphasige Wechselstrommotoren nur selten in Frage. Der Motor treibt die Trommelwelle mit Schnecke und Schneckenrad oder mehrfachem Zahnradvorgelege an. Da der Hauptvorzug des elektrischen Antriebes von Aufzügen in der vollkommenen Steuerfähigkeit und der hohen Betriebssicherheit liegt, bilden der Steuerapparat und die Sicherheitsvorrichtungen den wichtigsten Teil eines elektrischen Aufzuges. Die Bauart der Steuerapparate nebst Zubehör hängt von der gewünschten Art ihrer Bedienung ab. Diese erfolgt entweder von der Kabine oder von Anschlagstellen an den verschiedenen Stockwerken aus, und zwar entweder durch Übertragung mittels Seiles oder Handrades oder durch elektrische Übertragung.

Bei der Seilübertragung erfolgt die Bedienung mit Hilfe eines längs des Aufzugweges gespannten Seiles, das bei Steuerungen von der Kabine aus durch

diese hindurchgeführt wird. Da hierbei das allmähliche Einschalten eines Anlassers Schwierigkeiten machen würde, wird, um die Anfahrgeschwindigkeit und die Anfahrstromstärke von der Bedienung unabhängig zu machen, meistens ein einfacher Umschalter, der manchmal noch mit einer oder zwei Widerstandsstufen ausgerüstet ist, in Verbindung mit einem Selbstanlasser benutzt. Der erstere wird durch das Seil betätigt. Der letztere ist entweder so gebaut, daß durch einen Zentrifugalregler die Widerstandstufen nacheinander kurzgeschlossen werden, oder das Kurzschließen der Stufen erfolgt unabhängig von der Anfahrgeschwindigkeit durch eine besondere Hilfskraft, wie ein Gewicht oder ein Federwerk mit Windflügelhemmung. Bei der Handradsteuerung wird der Wendeanlasser mit Hilfe eines in der Kabine untergebrachten Handrades durch den Führer allmählich ein- und ausgeschaltet. Die Geschwindigkeit am Anfang und am Ende der Fahrt wird also unmittelbar durch den Führer geregelt.

Um einen Führer entbehren zu können, werden die Aufzüge in den Wohnhäusern in der Regel mit Druckknopfsteuerung ausgerüstet. Die in der Kabine untergebrachten Druckknopftafeln, die von den Druckknöpfen der Kabine betätigten Relais, die auf den an der Aufzugmaschine angebrachten Anlaßwiderstand arbeiten, und der als Wendeanlasser ausgebildete Anlasser sind die hauptsächlichsten Steuerteile einer Anlage mit Druckknopfsteuerung. In der Regel sind die Relais in einem im Maschinenraume stehenden Kopierapparat, der wie ein Fördermaschinenteufenzeiger die Bewegungen des Aufzuges in verkleinertem Maßstabe wiedergibt, vereinigt. Die Schaltungen werden derart ausgeführt, daß die Kabine nur dann in Bewegung gesetzt werden kann, wenn alle Türen geschlossen sind. An den Endpunkten der Fahrbahn werden Sicherheitsausschalter angebracht, die von der Kabine beim Zuweitfahren betätigt werden und ein sofortiges Stillsetzen des Aufzuges herbeiführen, sobald sie in Tätigkeit treten. Bei stark benutzten Aufzügen, insbesondere dann, wenn, wie bei Warenhausaufzügen, ein Führer ohnehin erforderlich ist, werden besondere Kabinenschalter in der Kabine angeordnet, die die Relais ein- und ausschalten, so daß im Gegensatz zu der normalen Druckknopfsteuerung auch das Stillsetzen der Kabine durch den Führer bewirkt wird. Zur Verbindung der Kabine mit dem Maschinenraum dient ein biegsames Kabel.

Bei Aufzügen für große Fahrgeschwindigkeit ist die Regelung mit Steuerdynamo (425), insbesondere wenn die Beanspruchung sehr hoch ist, vorteilhaft, die ein sehr genaues, von der Belastung unabhängiges Fahren ermöglicht. Wegen der durch den dabei nötigen Umformer bedingten dauernden Verluste kommt sie jedoch bei normal beanspruchten Aufzügen nicht in Frage.

IV. Fabrikbetrieb.

(763) Papierfabriken. Die wichtigsten Maschinen in Papierfabriken sind die eigentlichen Papiermaschinen, auf denen das Papier hergestellt wird. Sie stellen an den Antrieb verschiedene Sonderbedingungen, die durch einen Elektromotor, und zwar einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor, am vollkommensten erfüllt werden können. Es ist zunächst nötig, daß die Papiermaschine langsam und vollkommen stoßfrei auf die gewünschte Geschwindigkeit gebracht werden kann, eine Forderung, der mit Hilfe eines feinstufigen Anlassers leicht genügt wird. Ferner soll die gewünschte Geschwindigkeit unabhängig von den vorkommenden Belastungsschwankungen möglichst genau eingehalten werden, andererseits aber muß es möglich sein, die Drehzahl in weiten Grenzen zu ändern, entsprechend den verschiedenen Papiersorten, die auf der Maschine hergestellt werden sollen. Die Grenzen, innerhalb deren sie feinstufig regelbar sein muß, sind sehr weite, bis zu 1 : 20 und mehr. Energieverluste dürfen natürlich bei den verschiedenen Drehzahlen nur in geringem Maße vorkommen.

Diese Forderungen lassen sich in praktisch brauchbarer Weise nur mit Hilfe eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors erfüllen. Dabei erfolgt die Regelung ent-

weder mit Hilfe eines in den Magnetstromkreis geschalteten Widerstandes oder mittels Gegenschaltung oder mit Hilfe einer Steuerdynamo in Form der Leonardschaltung. In dem ersteren Falle sind, besonders bei sehr weitem Regelbereich, große Motoren nötig, da es möglich sein muß, das bei den verschiedenen Drehzahlen ziemlich unveränderliche Drehmoment auch bei stark geschwächtem Felde zu entwickeln.

Die Leonardschaltung (425) und die Gegenschaltung (745) stellen sich bei sehr großem Regelbereich und den größeren Papiermaschinen meistens billiger und wirtschaftlicher als ein Nebenschlußmotor mit Regelwiderstand im Magnetstromkreis. Im Anschluß an ein Drehstromnetz kommt in erster Linie die Leonardschaltung in Frage. Die Bedingungen hinsichtlich gleichmäßiger Drehzahl, gleichmäßigen Anlassens und feinstufiger Regelung lassen sich bei ihr am vollkommensten erfüllen. Der Einfluß der Belastungsschwankungen auf die Gleichmäßigkeit der Drehzahl ist bei geringer Spannung der Steuerdynamo, also geringer Papiergeschwindigkeit, am größten. Um ihn in den zulässigen Grenzen zu halten, nimmt man neuerdings, besonders bei den Maschinen für feine Papiersorten, mit Vorteil einen sogenannten Schnellregler zu Hilfe, der auch die niedrigste Papiergeschwindigkeit bis auf etwa ½ bis 1 % gleichmäßig hält.

Bei den Kalandern zum Trocknen und Glätten des Papiers erfolgt die Regelung der Geschwindigkeit ähnlich wie bei den Papiermaschinen. Im allgemeinen sind die Regelungsbereiche kleiner als bei den Papiermaschinen, so daß man in den meisten Fällen für die Regelung der eigentlichen Arbeitsgeschwindigkeit mit der Feldregelung auskommt. Für das Einziehen des Papiers wird vielfach das Aushilfsmittel benutzt, den Motor an eine niedrige Hilfsspannung zu legen und damit die erforderliche niedrige Geschwindigkeit (etwa $^1/_{10}$ der Höchstgeschwindigkeit) zu erreichen. Die sonstigen Hilfsmaschinen, wie Schleifer, Holländer, Haderschneider, Kollergänge usw. erfordern keine oder nur geringe Regelung der Drehzahl, so daß der gewöhnliche Drehstromasynchronmotor oder Gleichstrom-Nebenschlußmotor, letzterer unter Umständen mit Regelung der Drehzahl mittels Widerstandes im Magnetstromkreis stets genügen.

(764) Werkzeugmaschinen. Ist die Stromart nicht von vornherein, sei es durch Anschluß an ein bestehendes eigenes Kraftwerk oder an ein Stadtnetz, festgelegt, so ist die Entscheidung nach folgenden Gesichtspunkten zu treffen: Drehstrom läßt für kleine Leistungen die Verwendung von Kurzschlußankermotoren zu und gibt bei großen Entfernungen zwischen den einzelnen Werkstätten geringere Leitungsverluste als Gleichstrom. Dieser dagegen ist dem Drehstrom hinsichtlich Regelfähigkeit der Motoren überlegen, auch weisen die Kranausrüstungen die oben näher angegebenen Vorteile auf. Der Drehstrom ist daher nur bei großen Entfernungen zwischen den einzelnen Werkstätten vorzuziehen.

Diejenigen Werkzeugmaschinen einer Fabrik, die in der Regel gleichzeitig laufen, werden in Gruppen von einem Motor unter Zwischenschaltung einer Transmission angetrieben, während für die unregelmäßig benutzten Maschinen, wie große Dreh- und Hobelbänke, Schleifsteine usw. der Einzelantrieb vorzuziehen ist. Insbesondere gestaltet sich auch für die meisten Holzbearbeitungsmaschinen, wie Hobelmaschinen, Kreissägen, Bandsägen usw., teils wegen ihrer sehr hohen Geschwindigkeit, teils wegen der aussetzenden Betriebsart der Einzelantrieb vorteilhafter. Im gegebenen Falle können für Einzelantrieb noch andere Gründe sprechen, wie Schwierigkeiten bei der Anbringung der Transmissionen, bessere Zugänglichkeit zum Arbeitsstück, bessere Beleuchtung usw.[1]).

Soll mit Rücksicht auf die Verschiedenheit der Materialien und die Abmessung der Arbeitsstücke die nötige Regelung der Drehzahl von Drehbänken, Hobelmaschinen usw. auf elektrischem Wege vorgenommen werden, so ist ebenfalls

[1]) Kübler, Elektrische Einzelantriebe. ETZ 1908.

Einzelantrieb der Maschinen nötig. Sehr vorteilhaft gestaltet sich bei Gleichstrom dann die in amerikanischen Werkzeugmaschinenfabriken vielfach übliche Einstellung der verschiedenen Drehzahlen mit Hilfe eines Mehrleiternetzes, wobei es möglich ist, den Anker an verschiedene Spannungen zu legen, und unter Zuhilfenahme der Feldregelung die Möglichkeit einer weitgehenden feinstufigen Regelung mit normalen Motoren bei gutem Wirkungsgrad zu erhalten.

Was die Ausführungsart der Motoren angeht, so sind in den meisten Fällen gewöhnliche offene Motoren zulässig; nur in Holzbearbeitungswerkstätten sind geschlossene Motoren nötig, falls nicht für vollkommene Beseitigung des Staubes und der Späne unmittelbar an den Arbeitsmaschinen durch eine Staubsaugeanlage gesorgt ist.

Die erforderliche Motorleistung hängt von den angetriebenen Maschinen ab und ist in jedem Falle vom Lieferanten der Werkzeugmaschine anzugeben, falls sie nicht durch gleichartige schon im Betrieb befindliche Maschinen bekannt ist.

(765) Spinnereien. Der Betrieb der wichtigsten Maschinen, der Ringspinnmaschinen, stellt folgende Bedingungen an die Ausbildung des elektrischen Antriebs: Der Motor muß unempfindlich gegen Staub und Schmutz und auch bei dem unvermeidlichen feinen Staub praktisch feuersicher sein. Die Drehzahl muß möglichst gleichmäßig sein und nach Bedarf geregelt werden können. Der Gleichstrommotor läßt sich durch vollkommene Kapselung praktisch feuersicher machen. Die zur Kühlung nötige Frischluft kann dabei durch Rohrleitungen und Kanäle den Motoren zugeführt werden. Die Anker der Motoren werden mit Ventilatoren ausgerüstet, durch die die Luft angesaugt und durch den Motor hindurchgedrückt wird. Die Drehzahl kann mit Hilfe eines in die Feldwicklung geschalteten Widerstandes geregelt werden.

Neuerdings werden zum Antrieb der Spinnmaschinen in der Regel Wechselstrom-Repulsionsmotoren oder Drehstrom-Reihenschlußmotoren aufgestellt, deren Drehzahl sich ohne Widerstand durch Verdrehung der Bürsten verändern läßt. Um zu vermeiden, daß sich Schlingen oder Knoten im Garn bilden, ist es nötig, daß der Arbeitsvorgang, bei dem das gesponnene Garn auf die Spule aufgewickelt wird, schnell eingeleitet wird, d. h. die Beschleunigungsdauer kurz ist. Andererseits muß zur Vermeidung von Fadenbrüchen gleichmäßig beschleunigt werden. Ferner wird neuerdings, um mit einer bestimmten Ringspinnmaschine die höchste Leistung erzielen zu können, die Drehzahl des Motors während des Betriebes durch einen selbsttätig wirkenden „Spinnregler" so geregelt, daß das Garn stets mit der größten zulässigen Spannung auf die Spule gewickelt wird. Allen diesen Bedingungen kann beim Repulsionsmotor und beim Drehstrom-Reihenschlußmotor bequem mit Hilfe der Bürstenverschiebung genügt werden.

Mit Rücksicht auf die erforderliche Sicherheit gegen Feuersgefahr werden die Repulsions- und Reihenschlußmotoren ebenso, wie dies für die Gleichstrommotoren angegeben war, am besten ganz gekapselt und an eine Rohrleitung angeschlossen, durch die reine und kühle Luft zugeführt wird.

Die Verbindung zwischen Ringspinnmaschine und Motor erfolgt durch Zahnradvorgelege, wenn nicht unmittelbare Kupplung der Hauptarbeitswelle mit dem Motor möglich ist.

Die Hilfsmaschinen in Spinnereien, wie Ballenbrecher, Schlagmaschinen, Krempel usw. werden meistens an Transmissionen angeschlossen und von Gruppenmotoren, neuerdings vielfach auch durch Einzelmotoren angetrieben.

(766) Webereien. Die Webstühle werden wegen der Notwendigkeit, sie jederzeit einzeln schnell an- und abstellen zu können, ebenfalls einzeln angetrieben, und zwar gegenwärtig stets durch Drehstrommotoren mit Kurzschlußanker (Abb. 310). Da die erforderlichen Motorleistungen nur gering sind und nur etwa 0,3 bis 2 kW betragen, können die Drehstrommotoren trotz des Kurzschlußankers bequem so gebaut werden, daß sie das erforderliche doppelte bis dreifache Anfahrmoment

entwickeln. Um sie gegen Verstaubung zu schützen, werden die Motoren am besten ganz gekapselt. Ganz oder teilweise offene Motoren verlangen zu viel Reinigungsarbeit, was bei der großen Zahl der Motoren den Betrieb erschwert, und geben auch leicht zu Störungen Anlaß. In gewissen Sonderfällen, z. B. häufig bei Scher- und Stickmaschinen, muß es möglich sein, während des Betriebes eine zweite und dritte Geschwindigkeit einstellen zu können, zu welchem Zwecke polumschaltbare Drehstrommotoren brauchbar sind.

Die Verbindung des Stuhles mit dem Motor erfolgt am besten mittels Zahnradvorgeleges. Riemenantrieb wird zwar auch nicht selten gewählt, ist aber wegen des bis zu 10% größeren Reibungsverlustes weniger vorteilhaft. Mit Rücksicht auf die Verschiedenheit der herzustellenden Gewebe sind verschiedene Arbeitsgeschwindigkeiten des Webstuhles nötig, die durch Auswechslung der Zahnräder leicht eingestellt werden können. Ein besonderer Vorzug des Zahnradantriebes liegt auch noch darin, daß nach dem Anstellen des Stuhles fast sofort die volle Geschwindigkeit erreicht wird, und kein Schlipf wie beim Riemen auftritt, wodurch leicht Fehler im Gewebe herbeigeführt werden. Beim Abstellen des Stuhles, wobei die in Bewegung befindlichen Massen schnell durch Anziehen einer Bremse zum Stillstand gebracht werden müssen, würde infolge der verhältnismäßig großen Bewegungsenergie der in Drehung befindlichen Motormassen leicht Zähne brechen. Dieses wird vermieden entweder dadurch, daß durch den Bremshebel auch die Kupplung zwischen Motor und Stuhl gelöst wird, oder daß zwischen Motor und Webstuhl eine sogenannte Rutschkupplung eingebaut wird, die, sobald der Motor über sein volles Drehmoment hinaus belastet wird, anfängt zu gleiten.

Das Ein- und Ausschalten der Motoren erfolgt durch besonders gebaute Webstuhlschalter, kräftig ausgebildete, meistens in gußeisernen Kästen im Fußboden untergebrachte Schalter mit leicht auswechselbaren Kontakten.

Elektrischer Betrieb in der Landwirtschaft und Überlandzentralen.

(767) Allgemeines. Die ersten elektrischen Anlagen in der Landwirtschaft waren Einzelanlagen, die meistens zum Anschluß vorhandener Kraftbetriebe, wie Mühlen, Brennereien, Sägewerke u. dgl. als Gleichstromanlagen gebaut wurden. Hauptsächlich dienten sie der Beleuchtung, aber auch der Kleinkraft, wie Wasser pumpen und Häcksel schneiden, selten kamen sie fürs Dreschen in Anwendung. Wirtschaftliche Gesichtspunkte waren nicht maßgebend. Später schlossen sich mehrere günstig zueinander liegende Güter oder Gemeinden zur gemeinsamen Versorgung zusammen. Für diese Verhältnisse reichte der Gleichstrom noch aus. Mit der Entwicklung des Drehstromes wagte man sich an größere Gebiete, man erkannte die Bedeutung gerade der elektrischen Kraft für die Landwirtschaft, und so entstanden die ersten Überlandzentralen in rein ländlichen Gegenden, deren wirtschaftliche Ergebnisse allerdings wenig ermutigend waren. Etwa im Jahre 1905 setzte eine verstärkte, teilweise stürmische Bewegung zur Versorgung des platten Landes mit elektrischer Energie ein. Der Elektromotor sollte die Leutenot auf dem Lande, die infolge der Industrialisierung Deutschlands allmählich schärfere Formen angenommen hatte, wenn auch nicht ausgleichen, so doch erheblich mildern. Leider wurden beim Bau die alten Fehler (774) wiederum gemacht, so daß infolge der unausbleiblichen Fehlschläge ein heftiger Streit für und wider Überlandzentralen die Folge war. Nun lassen sich wohl für die Wirtschaftlichkeit ländlicher Überlandzentralen allgemein gültige Richtlinien aufstellen, die ganze Zusammensetzung des Gebietes muß aber von Fall zu Fall in Rechnung gesetzt werden. Wie verschieden da die Verhältnisse liegen, zeigt die nachstehende Tabelle 1, die dem statistischen Handbuch für das Deutsche Reich 1907 S. 114—117 entnommen ist:

Tabelle 1. Landwirtschaftliche Betriebe.

Größenklassen ha	Zahl der Betriebe 1000 ×	Größe der Flächen			
		landwirtschaftlich benutzt 1000 ha	forstwirtschaftlich benutzt 1000 ha	Öd- und Unland einschl unkultivierter Weide 1000 ha	Sonstige Fläche: Haus- und Hofraum, Wege und Gewässer 1000 ha
unter 2	3236	1808	413	85	109
2 – 5	1016	3285	546	205	103
5 – 20	998	9721	1850	768	196
20 – 100	281	9869	2197	903	186
über 100	25	7831	2574	293	331
Zusammen:	5556	32514	7580	2254	925

Kleingrundbesitz findet sich in der Hauptsache im Süden, Westen und Mitteldeutschland, Großgrundbesitz im Osten des Reiches vor. Bei ersteren sind Dreschgenossenschaften vorteilhaft, bei letzteren ist Einzelbetrieb notwendig.

(768) Verbrauchsunterlagen, bezogen auf den Hektar unterm Pfluge. Beleuchtung. Zur Zeit der Kohlenfadenlampe betrug der Verbrauch durchschnittlich 4 kWh/ha, der durch die Metallfadenlampe auf etwa 2 kWh/ha sank, infolge der besseren Ausnutzung, vor allen Dingen infolge Einführung der Beleuchtung für die Arbeiterhäuser, aber auf seine frühere Höhe und darüber stieg. Diese Angaben gelten für Groß- und Kleingrundbesitz bis etwa 8 ha. Bei noch kleineren Besitzungen, namentlich unter 5 ha, bietet die Einheit des ha keine sichere Grundlage für den Verbrauch mehr.

(769) Kleinkraft. Hier ist der Elektromotor besonders wertvoll. Seine Überlegenheit gegen alle anderen bisherigen Betriebsarten, namentlich auch in wirtschaftlicher Beziehung ist unbestritten, sein Anwendungsgebiet vergrößert sich ständig, weitgehendste Mechanisierung aller Arbeitsmaschinen muß und wird kommen und rückt damit erst die Vorteile des elektrischen Betriebes ins rechte Licht. Verbrauch etwa 4 bis 6 kWh/ha steigend bis auf 8 kWh/ha. Motoren für kleine Maschinen vorteilhaft tragbar, sonst ortsfest für Einzel- oder Gruppenantrieb. Einen Auszug aus einer umfassenden Zusammenstellung von W a l l e m in der ETZ 1910, S. 673 gibt Tabelle 2.

(770) Dreschen. Der Verbrauch des Dreschens hängt vom Umfang des Körnerbaues und der Intensität der Wirtschaft ab, nebenbei fällt auch das trockene oder feuchte Einbringen der Ernte und die Länge des Strohes ins Gewicht, er schwankt zwischen 10 bis 18 kWh/ha und beträgt im Durchschnitt 12 bis 14 kWh/ha. Ein Minderverbrauch infolge geringeren Körnerbaues kann durch intensivere Wirtschaft und bessere Bodenverhältnisse ausgeglichen werden. Die Motoren sind wohl durchgängig fahrbar angeordnet. Bei größeren Gütern ist zum Ausdrusch der vom Hofe weiter entfernten Mieten oder Feldscheunen ein fahrbarer Transformator erforderlich. Die Größe der Motoren muß wegen des Auslaufes und der schweren Stöße reichlich bemessen werden. Die geeignete Motorgröße liegt bei Gütern von etwa

10 h zwischen 3,3 u. 4,4 kW; 250 h höchstens 18 bis 21 kW;
25 „ „ 5,3 u. 7,0 „ ; 400 „ „ 21 bis 28 „
50 „ „ 7,0 u. 8,5 „ ; 500 „ „ 28 bis 33 „
125 „ „ 12,5 u. 18 „ ;

Bei Neuanschaffung von Dreschsätzen sollte man sich möglichst an die kleineren Größen halten. Der Streit um die Frage, ob das elektrische Dreschen mit

Tabelle 2. Zusammenstellung der wichtigeren Kleinkraftmaschinen.

Name	Arbeitsbreite und sonstige Größenangaben	Leistung für den zehnstündigen Arbeitstag	Normaler Kraftbedarf in Pf. bzw. in kW	Erforderliche Bedienung Leutezahl	Bemerkungen
Getreidereinigungsmaschine für Saatgut	40—70 cm	8—16 t	0,7—2,2	1—2	
Windfege	—	7,5—10 t	0,4	1—2	
	—	15—20 t	0,7	—	
Trieur	—	ca. 5 t	0,4	1—2	
	—	ca. 12,5 t	0,7	—	
Düngermühle	—	ca. 30 t	1,5—2 Pf.	1	
Pumpe für Be- und Entwässerungsanlagen	je nach Bedarf und Förderhöhe				
Entladevorrichtung in der Scheune (Heu- und Strohaufzug)	—	ca. 30 t	1,5	1—2	
Entladevorrichtung für ganze Fuder	—	ca. 100 t	2—4	1—2	
Elevator für Beförderung von Stroh, Heu und Getreide auf die Mieten oder den Boden in der Scheune	je nach örtlichen Verhältnissen	je nach Förderhöhe und Förderlast	ca. 2	2	
Sackaufzug	desgl.	desgl.	ca. 1	2	
Jauchepumpe	bei 4—5 m Förderhöhe	220 m³	ca. 0,4	1	
Transportrinne (Schüttelrinne)	je nach Länge und örtlichen Verhältnissen		2—4	1	
Transportband	30 m Förderlänge 400 mm breit	10—20 t	ca. 2	1	
Spill zum Befördern schwerer Lasten	....	......	je nach Leistung 4—9	1—2	Geschwindigkeit 5 m/s
Winde desgleichen	—	ca. 5 t	ca. 4	1—2	
Grobstrohpresse	—	ca. 15 t	ca. 4	3—5	
	—	30 t	ca. 7—9	—	
Glattstrohpresse mit Selbstbinder	1500 mm breit	ca. 18 t	ca. 2—4	3—5	
Mahlmühle, einfacher Mahlgang	1,5 m D.	ca. 0,2—0,4 t[1]	ca. 2,5—3	1	[1]) Je nach Getreideart und Schärfe der Steine
Häckselmaschine für Verkaufsgut	40 cm breite Schnittfläche	ca. 10 t	ca. 3—4	3	
Desgl. größeres Modell, einschl. Sieb, Reinigungsvorrichtung und Elevator	—	ca. 20 t	ca. 4—7	3	
Kreissäge	25 bis 50 cm D.	—	1—5	1	
Gattersäge	—	—	4—6	1	
Bandsäge, Bohrmaschine, Drehbank, Radmaschine, Schleifstein	—	—	8—2,2	1	

Name	Arbeitsbreite und sonstige Größenangaben	Leistung für den zehnstündigen Arbeitstag	Normaler Kraftbedarf in Pf. bzw. in kW	Erforderliche Bedienung Leutezahl	Bemerkungen
Torfpresse	—	30000—40000 Soden	ca. 4	10—12	
Schleifstein, Bohrmaschine, Drehbank, Bläser	—	—	ca. 1,5	1—2	
Häckselmaschine	30—40 cm	3—7 t Pferdehäcksel	1,5—2	2—3	
Ölkuchenbrecher	22—35 cm	ca. 15 t	ca. 0,55	1	
Rübenschneider	—	ca. 6,5 t	ca. 2	1	
Schrotmühle	160 cm Mahlscheiben-Durchm.	0,25—0,5 t	1,5—2	1—2	
Schrotmühle	600 cm Mahlscheiben-Durchm.	3—3,5 t	5—6	1—2	
Kartoffelquetsche	—	ca. 20 t	ca. 0,4—0,7	1	
Haferquetsche	8—15 cm	ca. 2 t	ca. 1,5	1	
Wasserpumpe für Trinkwasser und Stallversorgung	je nach Bedarf und Förderhöhe				
Torfstreu-Reißwolf	—	75—100 t	3—4	1	
Schafschere	—	—	ca. 0,1	1	
Fahrbare Säge	in einem Schnitt	1 Stamm von 40 cm Durchm.	ca. 4—6	1	

anderen Betriebsarten, namentlich mit Lokomobilenbetrieb, den Vergleich aushalten kann, ist müßig. Für sich betrachtet kann das elektrische Dreschen teurer werden, im Rahmen der Gesamtversorgung ist aber der elektrische Betrieb nicht nur durchaus wirtschaftlich, sondern es sind die Vorteile der steten Betriebsbereitschaft, namentlich in regnerischen Zeiten, gar nicht hoch genug einzuschätzen. Die Strompreise sind deshalb auch von untergeordneter Bedeutung. Hervorzuheben ist weiterhin die Gleichmäßigkeit des Ganges, die bei Lokomobilenbetrieb nur mittels besonders großer Typen erzielt werden kann. Zum Dreschen eines Zentners Getreide wird durchschnittlich 0,5 kWh benötigt. Zusammengefaßt kann man sagen, daß die reine Landwirtschaft für ihre Betriebe nach einer gewissen Reihe von Jahren der Entwicklung durchschnittlich 20 kWh/ha unterm Pfluge gebraucht, die sich voraussichtlich noch auf 24 kWh/ha steigern werden.

(771) Landwirtschaftliche Industrie. Mit der Landwirtschaft hängen aufs engste Betriebe, wie Mühlen, Molkereien, Stärkefabriken, Brennereien, landwirtschaftliche Maschinenfabriken, Trockenanlagen zusammen, die sich in allen Gegenden, wenn auch in wechselnder Zusammensetzung, wieder finden. Ihren Verbrauch kann man zu 25 bis 40% von dem der reinen Landwirtschaft annehmen, bezogen auf die Abgabe an ein ganzes Gebiet.

(772) Pflügen. In den Jahren 1908 bis 1912 hatten die elektrischen Pflüge in den Provinzen Posen und Pommern größere Verbreitung gefunden, als die Entwicklung des Motorpfluges einsetzte, die die weitere Ausdehnung zunächst hemmte. Da die Motorpflüge sich aber für welliges und steiniges Gelände nicht eignen, ihre Anwendbarkeit außerdem auf eine gewisse Pflugtiefe beschränkt ist,

so tritt für diese Fälle der Seilpflug, mag es sich um Dampf- oder Elektropflüge handeln, wieder in den Vordergrund. Wirtschaftlich ist der Elektropflug dem Dampfpflug überlegen, hat auch den Vorteil, bergiges Gelände noch bearbeiten zu können, in dem letzterer versagt, aber den Nachteil, daß er von der Leitung, namentlich beim Umsetzen, abhängig ist. Bei geschulter und eingearbeiteter Bedienungsmannschaft macht sich diese Abhängigkeit weniger bemerkbar. Könnte der Transport künftig vielleicht durch Lastkraftwagen erfolgen, würde dieser Nachteil fortfallen. Man unterscheidet Ein- und Zweimaschinenpflüge. Bei dem Einmaschinenpflug wird der zweite Windewagen durch den sogenannten Ankerwagen ersetzt. Der Windewagen besitzt je eine Trommel für das direkte und indirekte Seil. Durch Aufrollen des direkten Seils bewegt sich das Ackergerät auf den Windewagen zu, das indirekte Seil läuft über eine Rolle des Ankerwagens und ermöglicht dadurch den Gegenzug. Bei diesem System ist also nur eine Stromzuführung (fahrbarer Transformator) erforderlich, damit nur die Hälfte der Stichleitungen. Beim Zweimaschinenpflug sind 2 Windewagen vorhanden, der Betrieb regelt sich wie beim Dampfpflug. Entsprechend den beiden Stromabnahmepunkten sind mehr Stichleitungen zu bauen. Die Anlagekosten sind infolgedessen höher. In beiden Fällen wähle man das Stromzuführungskabel von den fahrbaren Transformatoren zum Windewagen aus praktischen Gründen nicht zu kurz, Spannung für die Motoren von 62 bis 72 kW Dauerleistung, infolgedessen etwa 1000 V. Die AEG baut hauptsächlich das Einmaschinensystem nach Brutzschke oder Meyer und eigener Konstruktion. Die SSW bevorzugen mehr das Zweimaschinensystem, das für schwere Böden anscheinend betriebssicherer ist, auch eine größere Leistung hat und vor allen Dingen die Benutzung eines Gerätes zum Schälen gestattet. Der Stromverbrauch beträgt durchschnittlich 48 bis 52 kWh für den gepflügten ha, der im einzelnen bei schweren Böden und tiefem Pflügen bis 80 kWh heraufgeht. Bei Einführung des elektrischen Pflügens ist ein Ausgleich der Schläge erforderlich, die möglichst rechtwinklig und nicht unter 100 Morgen sein sollen. Elektrische Motorpflüge befinden sich erst im Versuchsstadium.

(773) Feldbahn. In landwirtschaftlichen Betrieben haben sich elektrische Feldbahnen bis auf einige Fälle in Gegenden mit starkem Zuckerrübenbau infolge ihrer Unwirtschaftlichkeit bislang nicht einführen können.

Wirtschaftlichkeit.

(774) Anlagekosten. In der ETZ 1910 S. 607 ist die nachfolgende Tabelle 3 veröffentlicht, in der die 3 Hauptgruppen von Überlandzentralen zusammengestellt sind, und die zeigt, wie teuer verhältnismäßig rein landwirtschaftliche Zentralen bezogen auf 1 kW Zentralleistung werden.

Diese Zahlen brauchen aber nicht abzuschrecken, wenn man die Fehler der ersten Anlagen vermeidet, die darin bestanden, daß viel zu teuer gebaut, das Versorgungsgebiet zu klein gewählt, zum größten Teil mit fremden, also teueren Geldern gewirtschaftet und schließlich noch der Betrieb nicht nach streng kaufmännischen Grundsätzen geführt wurde.

Die Gesichtspunkte für die Kraftwerke sind die gleichen wie bei anderen Zentralen. Leitungen und Transformatorenstationen sind bei aller Betriebssicherheit so einfach wie möglich zu halten, Holzmasten sollen aber unter allen Umständen imprägniert sein. Auf richtige Wahl der Transformatoren ist besonders zu achten. Bei einem großen Versorgungsgebiet ist der Ausgleich derartig gut, daß es unwesentliche Spitzen nur in den Übergangsmonaten, in denen noch nicht oder nicht mehr gedroschen wird, gibt. Jede landwirtschaftliche Industrie muß neben den Landstädten zum Anschluß gebracht werden, die Ausnutzung wird dann eine viel bessere, als in den Beispielen nach Tabelle 3. Im Anschluß hieran ist die in Abb. 452 dargestellte Belastungskurve von der Überlandzentrale Belgard interessant.

Tabelle 3. Anlagekosten der Überlandzentralen für

Laufende Nummer	1. Industrie			2. Industrie und Landwirtschaft			3. Landwirtschaft		
	a für die nutzbar abgegebene kWh. M	b für 1 kW Zentralenleistung M	c Benutzungsstd. = Jahresabgabe / max. Belastung	a für die nutzbar abgegebene kWh. M	b für 1 kW Zentralenleistung M	c Benutzungsstd. = Jahresabgabe / max. Belastung	a für die nutzbar abgegebene kWh. M	b für 1 kW Zentralenleistung M	c Benutzungsstd. = Jahresabgabe / max. Belastung
1	1,48	1265	1500	5,05	6750	1180	7,30	2370	1300
2	1,24	1850	1470	3,58	1520	1640	7,15	1620	1550
3	1,00	1590	2110	2,96	2500	1240	6,67	2000	920
4	0,97	1720	1240	2,80	1360	800	5,40	2740	—
5	0,90	780	1490	2,35	1410	935	4,65	1550	835
6	0,78	710	2420	1,89	635	—	4,25	2130	800
7	0,69	1060	2100	1,85	1670	—	3,82	3170	1250
8	0,68	717	2280	1,73	1320	1520	3,64	2320	1110
9	0,58	650	2150	1,64	2470	1730	3,53	3660	1240
10	0,54	1080	4000	1,56	1145	1280	2,58	940	470
11	0,52	1250	3200	1,43	1460	1550	2,50	1160	875
12	0,51	520	1850	1,36	645	1170	2,15	1520	1520
13	0,48	1060	2820	1,24	1130	—	2,00	1960	—
14	0,46	—	3600	1,21	2020	2100	1,94	1310	—
15	0,44	525	2550	1,16	1290	1510	1,75	2200	1660
16	0,35	850	3300	1,13	—	—	—	—	—
17	0,35	1000	5940	1,06	742	1340	—	—	—
18	0,12	—	—	0,86	1225	2470	—	—	—
19	—	—	—	0,78	1130	2280	—	—	—
20	—	—	—	0,77	1120	1750	—	—	—
21	—	—	—	0,62	1085	2720	—	—	—
22	—	—	—	0,57	925	2620	—	—	—
23	—	—	—	0,20	—	3800	—	—	—
Mittelwert	0,67	1039	2445	1,64	1340	1770	3,95	2043	1127

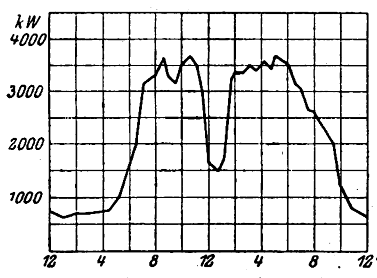


Abb. 452. Belastungskurve eines Wintertages von der Überlandzentrale Belgard.

Baut die Überlandzentrale möglichst mit eigenen Geldern und wählt eine kaufmännisch bewegliche Gesellschaftsform, so wird die Wirtschaftlichkeit nicht ausbleiben. Auf besondere Überschüsse kann verzichtet werden, Hauptsache ist die wirtschaftliche Verbesserung des Versorgungsgebietes. Es empfiehlt sich deshalb, daß die betreffenden Kommunalverbände selbst bauen und die Verwaltung nach den bereits erwähnten Grundsätzen einrichten.

(775) Abschreibungen und Tilgung. Die Abschreibungen können mit Rücksicht auf die Höhe des im Leitungsnetz angelegten Kapitals niedrig gehalten werden.

Es genügt, wenn 2 bis 3% vom gesamten ursprünglichen Anlagekapital jährlich abgeschrieben, oder zurückgelegt werden. Nachstehend einige mittlere Abschreibungssätze für fertig verlegte Anlageteile aus Überlandnetzen; die Rücklagen sind verzinslich angelegt und der Wert des Altmaterials ist berücksichtigt:

Kupferleitungen	1%,
Aluminiumleitungen	2%,
Eisenleitungen	10%,
Eisen- oder Betonmaste	1%,
Holzmaste mit Zubehörteilen	4%,
Transformatoren mit Schalteinrichtungen . . .	4%.

Soweit das Anlagekapital durch Anleihen, z. B. bei Kommunalverbänden aufgebracht wird, muß eine Tilgung in der von der Aufsichtsbehörde festgesetzten Weise erfolgen. Im allgemeinen rechnet man mit 0,75 bis 1,5%. Es ist dahin zu streben, die Tilgung erst nach 3 oder 5 Jahren beginnen zu lassen, um über die ersten Entwicklungsjahre besser hinweg zu kommen.

(776) Verkaufspreise und Tarife. Etwas niedrigere oder höhere Verkaufspreise sind für die Landwirtschaft nicht von ausschlaggebender Bedeutung, viel wichtiger ist, daß überhaupt elektrischer Strom zur Verfügung steht, da dessen Verbrauch auch bei bester Ausnutzung bezogen auf den ha unterm Pfluge gegenüber den anderen Unkosten durch Düngung und Bearbeitung des Bodens sehr gering ist. Aus dieser Erwägung heraus ist es überflüssig, z. B. für Dreschen besondere, niedrigere Preise festzusetzen, und verkehrt, die Tarife nicht ausreichend zu wählen. Schuld an diesen Zuständen und dem Streben nach ungesunden Verkaufspreisen tragen die Baugesellschaften, die sich durch gegenseitiges Unterbieten den Rang abzulaufen suchten.

Die Wahl des Tarifsystems gehört zu der wichtigsten Aufgabe. In dem vorliegenden Abschnitte handelt es sich vorwiegend um die Bedürfnisse der landwirtschaftlichen Überlandzentralen, welche oft ganz andere Bedürfnisse haben als die Industriezentralen. Da jedoch die bei diesen im Laufe der Jahre eingeführten Tarife sehr vielseitig geworden sind (619 u. ff.), so eignen sich eine große Anzahl derselben auch für die vorliegenden Zwecke. Neben reinen Zählertarifen kommen Pauschaltarife und gemischte Tarife mit Grundgebühren zur Anwendung. Da der Tarif eine Prämie auf die Ausnutzung enthalten soll, wird von den verschiedensten Seiten empfohlen, für die Landwirtschaft eine nach der Größe des Besitzes gestaffelte Grundgebühr für den Morgen unterm Pfluge und einen Einheitspreis für Licht und Kraft vorzusehen. Die Folge ist ein selbsttätiger Zwang zur guten Ausnutzung, Fortfall der getrennten Licht- und Kraftnetze, damit bedeutende Ersparnis der nicht unerheblichen Installationskosten, Anschluß von Koch-, Heiz- und landwirtschaftlichen Industriestrom an ein Netz. Ähnliche Vorschläge in der Broschüre „Bemerkungen zum Potsdamer Tarif von Dr. K. Markau", Verlag von Springer.

Bei gewerblichen Betrieben Festsetzung einer Grundgebühr nach Anschlußwerten, etwa für jede Lampe und Pferdekraft eines Motors. Näheres darüber ETZ 1918, S. 473 und 1919, S. 55. Bei Mühlen, Stärkefabriken und Trocknungsanlagen Ausbau entsprechender Tarife für Nachtbelastung.

Elektrische Bahnen.

(777) Betriebsarten. Die Wahl des Systems, der Betriebsmittel und der Streckenausrüstung ist aufs engste verknüpft mit der Art und dem Charakter des Bahnbetriebes.

Man unterscheidet den leichten Straßenbahn- (engl. tramway, amerik.



street railway) Betrieb mit kleinen Zugkräften und Geschwindigkeiten und den vollbahnartigen (engl. railway, amerik. railroad) Betrieb, der folgendermaßen gekennzeichnet werden kann:

1. Schnellzugsbetrieb mit großen Stationsentfernungen und hohen Geschwindigkeiten. Die Motoren sind für Dauerleistung zu bemessen. Hohe Anfahrbeschleunigungen sind unwesentlich.

2. Stadtschnellbahn- oder Beschleunigungsbetrieb mit kurzen Stationsentfernungen und hohen Anfahrbeschleunigungen. Die Motoren sind für häufiges Anfahren in kurzen Zwischenräumen zu bemessen.

3. Schwerer Güterzugsbetrieb mit großen Anfahrzugkräften und mittleren Geschwindigkeiten. Die Motoren sind für die Höchstzugkräfte, die häufig und in kurzen Zwischenräumen auftreten, zu bemessen. Hohe Anfahrbeschleunigungen sind unwesentlich.

I. Kritik der Systeme.

(778) Fahrdrahtspannung. Für die leichten Straßenbahnbetriebe ist heute das Gleichstrom-Niederspannungssystem mit 500—600 V am Fahrdraht allgemein angenommen. Für den Betrieb der Vollbahnen dagegen ist man sich zurzeit nur über die Notwendigkeit der Verwendung hoher Spannungen einig. Über das System aber bestehen noch Meinungsunterschiede.

Die für die Zugförderung erforderlichen großen Leistungen im Vollbahnbetriebe verlangen nämlich die Wahl von hohen Spannungen, um die vom Fahrdraht abzunehmenden Stromstärken in jenen praktischen Grenzen zu halten, die durch die konstruktiven Rücksichten für den Bau der Stromabnehmer und der Fahrdrahtleitung gegeben sind, während wirtschaftliche Rücksichten, Ersparnisse an Kupfer in der Oberleitung, Beschränkung der Zahl der Unterwerke, Bedingungen für die Sicherheit und die Aufrechterhaltung des Betriebes (Speisung einer Teilstrecke von einer benachbarten) eine weitere Erhöhung der Fahrdrahtspannung bedingen. Von diesem allgemeinen Gesichtspunkte aus scheinen daher Einphasenwechselstrom, Drehstrom und Gleichstromhochspannung in gleicher Weise für den Betrieb von Vollbahnen geeignet, und jedes einzelne System ist vielfach befürwortet und angegriffen worden (vgl. Literatur S. 544). Aber während die für Gleichstrom und Drehstrom zulässigen Fahrdrahtspannungen immer noch nicht jene für den ökonomischen Betrieb für Vollbahnen zweifellos erforderliche Mindestspannung von etwa 6—10 kV erreichen, haben Einphasenbahnen mit 15 bis 20 kV am Fahrdraht einwandfreien Betrieb ergeben.

Gleichstrommotoren arbeiten schon heute mit 1,5 kV am Kollektor einwandfrei. Baute man sie für 2—3 kV, so ergäben zwei solcher Motoren in Reihe sogar 4—6 kV Fahrdrahtspannung. Aber abgesehen von der Notwendigkeit, zwei Motoren zu verwenden und diese unveränderlich in Reihe laufen zu lassen, ist ein derartiger Betrieb auch gefährlich, weil die der Bedienung unterliegenden stromführenden Teile (Bürsten, Kollektor) die volle Spannung gegen Erde besitzen.

Im Drehstromsystem dagegen drückt die doppelpolige Oberleitung und die besonders bei Weichen und Kreuzungen schwierige Isolation der beiden Fahrdrähte gegeneinander die Fahrdrahtspannung gegen eine Grenze von ca. 3—6 kV. Die Möglichkeit, die Ständer direkt für Hochspannung zu wickeln, wird oft als Vorteil des Drehstroms angesehen. Das ist aber auch für Einphasenmotoren möglich und für die Spindlersfelder Strecke ausgeführt worden. Die Verwendung von Hochspannung im Ständer drückt aber ebenfalls die Fahrdrahtspannung gegen eine Grenze von 3—6 kV, erschwert die Herstellung und Ausbesserung der Motoren und ergibt unwirtschaftliche Ausnützung des Wickelraumes. Indessen besitzen

selbst die für Hochspannung gewickelten Einphasenmotoren nur Niederspannung am Kollektor und allen der Bedienung zugänglichen Teilen und sind dem Hochspannungs-Drehstrommotor in der Einfachheit der Wicklungen ohne Kreuzungen und durch die im Niederspannungskreis erfolgende Fahrtwendung an Betriebssicherheit überlegen.

Telephonstörungen durch Wechselstrombahnen bilden den schwerwiegendsten Einwand gegen das Einphasensystem. Die drei wichtigsten Störungsursachen sind der Spannungsabfall durch die Erdrückleitung, die elektrostatische und die elektromagnetische Induktion. Wirksame Abhilfe ist Verkabelung der Leitungen, mindestens aber die Verdoppelung der Einfachleitungen und die Verbesserung der Isolation (vgl. ETZ 1920, S. 221). — Kuntze, Schwachstromstörungen bei Einphasenbahnen, München 1920.

(779) Speisung und Verteilung. Die doppelpolige Oberleitung und die damit verbundenen Schwierigkeiten in der Ausrüstung der Strecke bilden den schwerwiegendsten Einwand gegen das Drehstromsystem. Die Möglichkeit einer vollständig zuverlässigen und guten Ausführung der doppelpoligen Oberleitung ist nach den Erfahrungen der letzten Jahre freilich keine Frage mehr.

Die Energieübertragung mittels Drehstroms hat der einphasigen Übertragung gegenüber bei gleichen Spannungen gegen Erde und bei gleichen Verlusten eine Kupferersparnis von ca. 15,5 % voraus. Da aber die Fahrdrahtspannung im Einphasensystem höher als im Drehstromsystem gewählt werden kann, so ist es tatsächlich das Einphasensystem, das den geringeren Kupferverbrauch für sich hat.

Die niedrige Fahrdrahtspannung der Gleichstrombahnen erfordert für längere Strecken Unterwerke mit umlaufenden Maschinen und Drehstrom-Gleichstromschaltanlagen, die der Wartung bedürfen. Unterwerke, allerdings nur mit ruhenden Transformatoren, sind auch für lange Dreh- und Einphasenstromstrecken erforderlich.

Die Einrichtung und die Schaltanlage der Einphasenwerke ist unter allen Systemen am einfachsten.

Die Möglichkeit zu puffern und die Kraftwerksmaschinen nur für den mittleren Energiebedarf bemessen zu können, ist oft zu Unrecht dem Gleichstrom allein zugeschrieben und als dessen besonderer Vorteil empfunden worden. Indes können auch Wechselstromwerke in ähnlicher Weise wie Gleichstromwerke mit Pufferanlagen (Speicherbatterien oder Schwungradpuffern) ausgestattet werden (808). (Albtalbahn, ETZ 1915, S. 181.)

(780) Geschwindigkeitsregelung. Drehstrommotoren können durch Widerstände (Burgdorf-Thun), durch Polumschaltung (Simplon) und durch Kaskadenschaltungen (Valtellina) geregelt werden (746). Für die letztgenannte Regelungsart sind mindestens zwei Motoren erforderlich. Keine der Methoden vermag dem Drehstrommotor die für Bahnbetrieb erwünschte Schmiegsamkeit zu geben.

Gleichstrommotoren werden durch Widerstände in Reihe mit dem Anker und durch Schwächung oder Unterteilung des Feldes geregelt und besitzen — von Anfahrstufen abgesehen — mehrere wirtschaftliche Geschwindigkeitsstufen. Einphasenmotoren werden mit Hilfe von Transformatoren fast verlustfrei geregelt. Diese Regelungstransformatoren machen den Einphasenmotor unempfindlich gegen die Spannungsschwankungen der Linie. Während das Drehmoment des Drehstrom-Induktionsmotors quadratisch mit der Linienspannung und die Geschwindigkeit des Gleichstrommotors (mit der Höchstgeschwindigkeit in der Parallelstellung) geradlinig mit der Spannung fällt, ist es bei Einphasenmotoren durch Anordnung von Klemmen am Transformator, die einer höheren Spannung entsprechen, möglich, den Motor in weiten Grenzen von der Linienspannung unabhängig zu machen

In allen Fällen ist die Regelung des Einphasenmotors derjenigen des Drehstrommotors (wo sie wirtschaftlich ist) an Einfachheit, derjenigen des Gleichstrommotors aber an Wirtschaftlichkeit überlegen.

(781) Nutzbremsung. Die Möglichkeit der Stromrückgewinnung, die bei Drehstrom stets gegeben und als sein besonderer Vorteil angesehen worden ist, liegt unter Verwendung allerdings zusätzlicher Einrichtungen auch bei allen anderen Systemen vor. Auf der Chicago-Milwaukee-St.-Paul-Bahn ist die Stromrückgewinnung für 3 kV Gleichstrom mit bestem Erfolg durchgeführt. Vergleichende Zusammenstellung über Nutzbremsung verschiedener Systeme und Literaturangaben s. Seefehlner, El. Kraftbetr. u. Bahnen 1917, S. 225.

Indessen ist die Nutzbremsung der Motoren mit einer Reihe betriebstechnisch nicht ganz gefahrloser Schwierigkeiten verknüpft ist. Einerseits ist die Sicherheit des Zuges (der schlaffen Kupplung wegen) bei der Talfahrt gefährdet, andererseits unterliegen die Kraftwerksmaschinen der Gefahr des Durchgehens.

(782) Wirtschaftlichkeit. Die Unterhaltungskosten des gegenwärtigen Einphasensystems sind denen des Gleichstroms ungefähr gleich. Dagegen sind die gesamten Betriebskosten für Einphasenstrom geringer, weil es höheren mittleren Wirkungsgrad und geringere Betriebskosten in den Unterwerken hat. Dieser Unterschied wird um so größer sein, je länger die Bahn und je geringer die Verkehrsdichte ist. Die zweifellos billigere Ausrüstung der Drehstrombetriebsmittel wird durch die höheren Kosten der Drehstromoberleitung und die ebenfalls billigere Gleichstromausrüstung durch die Kosten der Unterwerke mehrfach aufgewogen. Das größere Gewicht der Einphasenausrüstungen aber ist deshalb kein Nachteil, weil die Anzugskraft des Motors ausreicht, die Räder zum Schleifen zu bringen.

(783) Zusammenfassung. Von Einzelheiten abgesehen, steht heute jedenfalls soviel fest, daß die Betriebssicherheit und Einfachheit die einpolige Oberleitung, wirtschaftliche Rücksichten aber die Verwendung hoher Fahrdrahtspannungen verlangen. Beiden Anforderungen wird das Einphasensystem gerecht.

Für besondere Verhältnisse, z. B. für Vorort- oder Zwischenstadtbahnen von geringer Streckenlänge und dichtem Verkehr ist freilich hoch- oder niedergespannter Gleichstrom mit dritter Schiene sehr geeignet. Im Interesse der Einheitlichkeit und des Übergangsverkehrs kann sich aber auch in solchen Fällen oft die Verwendung des Einphasensystems empfehlen. Dem Drehstromsystem haften im Vollbahnbetriebe, ungeachtet guter Betriebsergebnisse in Italien, erhebliche Nachteile an. Auf Strecken ohne Weichen und Verschiebegleise (Tunnels) kann es oft von Vorteil sein. In nicht allzuferner Zeit werden vielleicht auch Quecksilbergleichrichter für schwere Zugförderung geeignet sein.

Die Wahl des Stromsystems ist letzten Endes eine Frage des Stromzuführungssystems und damit eine Frage der Fahrdrahtspannung und des Leitungssystems. Aber während die geforderte einpolige Oberleitung auf dem europäischen Festland zu nahezu einheitlicher Annahme des Einphasensystems geführt hat, gibt sie in Amerika Veranlassung zur stetigen Steigerung der Gleichstromspannung und zu Versuchen mit Umformerlokomotiven.

Literatur: Gleichmann, Denkschrift z. Einführg. el. Betr. auf bayr. Staatsb. Z.V.D.I. 1908, EKB 1908, ETZ 1910. — Elektrisierg. d. Berliner Stadtb. Z.V.D.I. 1907, EKB 1907. — Elektrisierg. d. Gotthardbahn ETZ 1918, S. 275. EKB 1918. — Hruschka, Elektrisierg. d. österreich. Staatsb. EKB 1911, S. 561. — Mauduit, Bericht d Studienkommiss. f. Elektrisierg. Frankreich, E & M Bd. 37, S. 553, Revue gén. de l'éléctricité Bd. 5 u. 6. — Kummer. Wahl der Stromart usw., Sammlung Vieweg, Braunschweig. — Dittes, Energieversorgg. d. Vollbahnen, E & M 20. Juli 1919. — Ceija, Amerikan. Stellgn. i. d. Frage Gleichstrom und Wechselstrom usw. E & M 1914, S. 301. — Wittfeld, El. Zugfördrg. und Diesellok., Zentralbl. d. Bauverw. 1919, S. 513. — Alexander, El. Betr. auf Fernbahnen AEG-Zeitg. März 1920ff. — Phasenumformerlok, E & M 1919, S. 437; 1920, S. 86.

II. Betriebsmittel.

1. Allgemeine Gesichtspunkte.

(784) Wahl der Motorleistung. Die Größe der Motoren wird in der Regel mit Rücksicht auf die Erwärmung festgesetzt, wenn nicht die höchste erforderliche Zugkraft, insbesondere im Beschleunigungs- und Rangierbetrieb, die Wahl einer höheren Motorleistung vorschreibt. Die Nennleistung der Motoren wird durch die nach den Normalien des VDE zulässige Erwärmung begrenzt (§ 19 der Normalien für Bewertung und Prüfung el. Maschinen). Dabei ist darauf zu achten, daß normale Straßenbahnmotoren oft vollkommen gekapselt laufen. Neuerdings hat es sich als zulässig erwiesen, an geeigneten Stellen Außenluft ins Motorinnere treten zu lassen, die Öffnungen mit gelochtem Blech zu verschließen und durch die Art der Luftführung dafür zu sorgen, daß sich etwa mitgeführte Staubteilchen im Motor nicht ablagern können. Im geschlossenen Lokomotivgehäuse hochgelegte Motoren werden in der Regel künstlich gekühlt.

Für schweren Betrieb empfiehlt es sich, die gewählten Motoren an Hand der Kennlinien des Fahrplanes und der Fahrdiagramme auf Erwärmung nachzurechnen (814). Für stark aussetzenden Betrieb (Straßenbahnen) genügt es, wenn der Motor die geforderte mittlere Leistung eine Stunde lang auf dem Prüfstand abgeben kann (Luftgekühlte Straßenbahnmotoren, EKB 1915, S. 368).

Anfahrbeschleunigung, Bremsverzögerung. Für die Festsetzung der notwendigen höchsten Zugkraft ist neben dem Steigungs- und Zugwiderstand die angenommene höchste Anfahrbeschleunigung maßgebend (810).

Stadtbahnen weisen Anfahrbeschleunigungen von 0,2—0,7 m/s² auf. Die auf die ganze Anfahrzeit bezogene mittlere Beschleunigung beträgt selten mehr als 0,5 m/s². Für Vollbahnen mit großen Stationsabständen können Anfahrbeschleunigungen von 0,1—0,2 m/s² gewählt werden. Für 1 t Zuggewicht ist etwa 1 kg Zugkraft für jedes cm/s² erforderlich. Für Beschleunigungsbetriebe kann mit 50—70 kg/t höchster Zugkraft in der Ebene gerechnet werden. (Über die Bedeutung der Beschleunigung für die Betriebsart vgl. 777.)

Die Beschleunigung ist jedoch, sofern genügende Zugkraft vorhanden ist, durch das Adhäsionsgewicht der angetriebenen Achsen begrenzt. Die größte mögliche Zugkraft beträgt im Mittel $^1/_5$ bis $^1/_6$ des Adhäsionsgewichtes, steigt bei Verwendung kräftiger Sandstreuer bis auf $^1/_3$ und sinkt bei schlechtem Gleiszustand (feuchtem Wetter und Reifbildung) bis auf $^1/_{13}$. (Brecht, Ausnützung des Adhäsionsgewichtes, EKB 1914, S. 277.)

Die Wahl der Beschleunigung erfolgt für Motorwagenzüge allein mit Rücksicht auf die aus Motorwagen mit Anhänger bestehende Zugeinheit. Für Lokomotivzüge dagegen ist das höchste angehängte Zuggewicht maßgebend. Daher sind für Stadtschnellbahnen mit hohen Beschleunigungen Motorwagenzüge vorzuziehen (ETZ 1913, S. 616).

Bei der Wahl der Bremsverzögerung ist in ähnlicher Weise darauf zu achten, daß die Zahl der abgebremsten Achsen für die Bremskraft ausreicht. Die zulässige Verzögerung ist abhängig von der Wirkung auf die Fahrgäste und auf den Wagenkörper und kann im Mittel zu 0,5 m/s², für Stadtbahnen zu 0,7 bis 0,8 m/s² angenommen werden (Luftdruckbremsen). Verzögerungen von 1 m/s² sollen nicht überschritten werden. Im Notfalle sind 2 m/s² zulässig. Für leichten Straßenbahnbetrieb und mäßige Geschwindigkeit genügt die Handbremse, besonders wenn Gegenstrom- oder Kurzschlußbremsung als Gefahrbremse vorgesehen ist. Vergleichende Bremsversuche und Betriebskostenberechnungen mit Luftdruckbremsen, elektrischen Kurzschluß- und Solenoidbremsen usw. EKB 1909, S. 111.

Wahl der Zugeinheit. Für Straßenbahnen bildet der einzelne Motorwagen mit oder ohne Anhänger das natürlichste und wirtschaftlichste Betriebsmittel. Schwere Züge dagegen, für die ein einziger Motorwagen nicht mehr ausreicht, können entweder aus mehreren Motorwagen mit Anhängern bestehen

oder von Lokomotiven gezogen werden. Die Wahl der sogenannten Zugeinheit bildet eine der wichtigsten Fragen vom wirtschaftlichen und verkehrstechnischen Standpunkte aus.

Motorwagenzüge sind z. B. für Straßenbahnbetrieb oft deshalb empfehlenswert, weil einerseits die durch die kurzen Stationsentfernungen notwendige hohe Anfahrbeschleunigung die Nutzbarmachung des Adhäsionsgewichtes vieler Wagenachsen erfordert, andererseits die zu den verschiedenen Tageszeiten stark schwankenden Verkehrsziffern auch Züge wechselnder Länge verlangen, die wirtschaftlich und rasch nur gebildet werden können, wenn der Motorwagen (und Anhänger) die Zugeinheit ist. Dasselbe gilt für Linien mit Kopfstationen, in denen das Umsetzen und Verschieben der Lokomotive erhebliche Zeitverluste verursacht.

Wo diese Bedingungen nicht zutreffen, sind jedoch Lokomotivzüge den Motorwagenzügen meist überlegen. Lokomotiven erfordern geringere Unterhaltungskosten als Motorwagen. Besonders die hochgelegten Motoren erleichtern die Zugänglichkeit, Aufsicht und Unterhaltung und gestatten die Verwendung kräftiger Motorlager.

Für viele Vollbahnlinien wird ein gemischter Betrieb, in denen Motorwagenzüge den schwachen und öfteren Zwischenortsverkehr, Lokomotivzüge aber den schnelleren Fernverkehr übernehmen, von größtem Vorteil sein (vgl. auch 818).

(785) Antrieb der Fahrzeuge. Die Motoren treiben die Triebachsen der Straßenbahnen am besten mittels Zahnradvorgeleges an, dessen großes Rad auf die Wagenachse aufgekeilt ist. Auf diese stützt sich gleichzeitig (ungefedert) mittels Tatzenlagers der tiefhängende Motor, der andererseits gefedert an einem Wagenquerträger aufgehängt ist (Straßenbahnaufhängung).

Die Radkastenabstände betragen bei Straßenbahnen 75—120 mm (selten weniger) über SO, je nach der Unterhaltung der Strecke, für Vollbahnen 125—150 mm. Der von der Preußischen Staatsbahn vorgeschriebene Abstand beträgt 150 mm. Grubenbahnen verwenden 40—50 mm.

Der Vorteil des Zahnradantriebes liegt in der Möglichkeit, auch für niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten leichte und schnell laufende Motoren verwenden und große Zugkräfte am Radumfang ausüben zu können, und ist deshalb insbesondere für schweren Güterzugsbetrieb geeignet. Den tiefhängenden Motoren sind aber durch den Laufraddurchmesser Leistungsgrenzen gezogen, die in Verbindung mit dem Bau von Motoreinheiten wachsender Größe, sowie allgemeinen Erwägungen über Lauffähigkeit der Lokomotive, günstige Schwerpunktslage und Verringerung der unabgefederten Massen dazu geführt haben, die Motoren hoch zu legen und im abgefederten Lokomotivrahmen zu lagern. Für die Motoren selbst ist diese Lösung vorteilhaft, weil die Motoren in offener Ausführung gebaut werden und der Bedienung leichter zugänglich gemacht werden können.

Die hochliegenden Motoren übertragen ihr Drehmoment auf die Triebachse entweder unmittelbar oder über eine Vorgelegewelle mit Hilfe von Kuppelstangen. Da aber die Kuppelstangen eine starre Verbindung zwischen den ungefederten Treibrädern und den abgefederten Motormassen darstellen, muß eine Anordnung gewählt werden, die die Wirkung des Federspieles ausschaltet. Wo eine Vorgelegewelle vorhanden ist, soll sie daher in angenähert gleicher Höhe mit der Triebachse liegen. Andernfalls bietet für unmittelbaren Antrieb die Wahl einer in der Höhe der Triebachse im federnden Rahmen gelagerten Blindwelle eine ausgezeichnete Lösung. Die Blindwelle besitzt gegen den Motor kein Spiel. Da sie überdies in gleicher Höhe mit den nicht abgefederten Treibachsen liegt und das Drehmoment mittels horizontaler Stangen auf sie übertragen wird, kann auch nur die horizontale Komponente des Federspiels wirksam werden. Diese aber ist beim nahezu vertikalen Federspiel vernachlässigbar (vgl. Brecht, Neuere Bauarten von Wechselstromlokomotiven, Zeitschr. d. V. d. I. 1909, S. 993 und Heyden, Beitrag zur Frage des Antriebes elektrischer Vollbahnlokomo-

tiven, EKB 1909, S. 308. Storer u. Eaton, Design of Electric Locomotive, Electrician v. 28. 10. 1910, S. 88, Referat ETZ v. 14. 12. 1910). Kummer, Mas hinenlehre d. elektr. Zugförderung. Berlin, Springer 1915, Baeker, Antriebe und Bauarten el. Lok. Glasers Annal. 1920. Bd. 86. Heft 8/9.

Für eine andere zuerst von Ganz & Co. ausgeführte Lösung sind 2 Motoren notwendig, welche durch einen dreieckigen Kuppelrahmen derart miteinander gekuppelt sind, daß die Verbindungslinie die eine Seite eines Dreiecks darstellt, dessen gegenüberliegende Spitze beim Lauf einen dem Motorkurbelkreis gleichen Kreis beschreibt, der in gleicher Höhe mit den Treibachsen liegt. Hierdurch wird das Drehmoment nur in horizontaler Richtung unter Ausschaltung der Federspielbewegung des Lokomotivrahmens übertragen (Patent Westinghouse-Kando, vgl. ETZ 1910, Heft 41 u. 42, Kleinow, El. Kraftbetr. u. Bahnen 1910, Heft 25, 1913, S. 337.

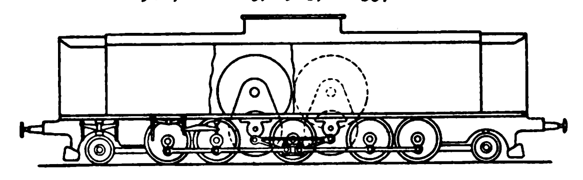


Abb. 453. Lokomotive mit hochliegenden Zahnradmotoren.

Stehende Ausführungsbeispiele sind einerseits die Lötschberg-Lokomotiven der Maschinenfabrik Örlikon mit hochliegenden 800 kW-Zahnradmotoren, die die Leistung mittels Kando-Dreieck auf die Triebräder übertragen (Abb. 453), andererseits die Schnellzugslokomotiven Halle der Maffei-Schwartzkopff-Werke mit hochliegenden Motoren von 1000 kW und Parallelkurbelantrieb (Abb. 454).

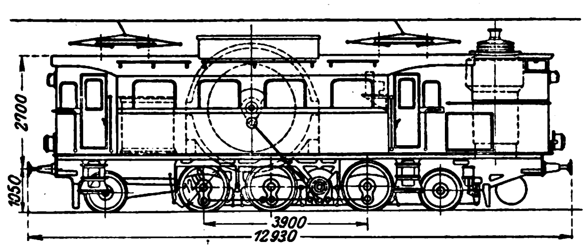


Abb. 454. Schnellzugslokomotive mit hochliegenden Motoren und Parallelkurbelantrieb.

Der Parallelkurbel- und der Kuppelrahmenantrieb neigen zu Schüttelerscheinungen, die oft zu Zerstörungen des Triebwerks führen. (Kummer, Schweiz. Bauz. Bd. 64, Nr. 11, 12. — Buchli, ETZ 1914, S. 612, 643. — Wichert, EKB 1914, S. 325; ETZ 1915. — Müller, Schweiz. Bauz. v. 20. 9. 1919, 6. 3. 1920. — Couwenhoven, Forschgsarbt. V. D. I. Springer, Berlin. — Döry, ETZ v. 22. 4. 1920).

Besondere Ausführungsformen direkt auf die Laufachse aufgesetzter Motoren sind in Amerika ausgebildet worden. Die Gleichstromlokomotiven der New-York-Central verwenden ungefedert auf der Achse sitzende Anker, deren Magnetjoche durch die Wagenquerträger selbst gebildet werden, während die Wechselstromlokomotive der N. Y. N. H. H. R. die Anker auf eine die Laufachse umgebende Hohlwelle setzt, und die Triebräder mittels federnder Kupplungen antreibt.

Zusammenstellung bisher ausgeführter Antriebsarten vgl. Lydall, El. Railway J. v. 27. 12. 1913.

2. Die Motoren und ihre Regelung.

(786) Gleichstrom. Die gebräuchlichen Betriebsspannungen sind 500—600 V für Straßenbahnen und leichte Bahnbetriebe ohne besonderen Bahnkörper innerhalb von Städten, sowie 800—1500 V außerhalb von Städten, bzw. für Bahnen mit besonderem Bahnkörper (Berliner und Hamburger Hochbahn 800 V, Köln-Bonn 1000 V). Die Durchbildung des Wendepolmotors, dessen Bau die Anwendung höherer Betriebsspannungen erst gestattete, hat insbesondere in Amerika dazu beigetragen, die Normalspannungen in rascher Folge zu erhöhen. Die Butte, Anaconda & Pacific-Bahn hat auf 41 km langer Strecke 2,4 kV eingeführt. Mit gleicher Spannung elektrisiert die Canadian-Northern-Bahn ihre Endstrecke mit längerem Tunnel. Die Chicago, Milwaukee & St. Paul-Bahn verwendet 3 kV, die Lancashire- und Yorkshire-Bahn betreibt seit einigen Jahren Triebwagenzüge mit 3,5 kV und die Westinghouse-Gesellschaft hat eine Ausrüstung für 5 kV (2 Doppelmotoren, 4 Anker zu 1250 V, 35 kW, EKB 1916, S. 175) gebaut.

Der Vorteil der Wendepolmotoren liegt aber nicht nur in der Möglichkeit der Verwendung höherer Spannungen und der Vergrößerung des Wirkungsbereiches der Kraftwerke, sondern auch in der Möglichkeit einer wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung. Während man sich bei Wagenausrüstungen mit Motoren ohne Wendepole mit nur zwei wirtschaftlichen Geschwindigkeiten zufrieden geben muß, der einen bei Reihen-, der anderen bei Parallelschaltung der Motoren, ermöglicht die Eigenschaft des Wendepolmotors, auch bei stark geschwächtem Felde einwandsfrei zu laufen, eine weit feinere Geschwindigkeitsabstufung ohne Verwendung von Vorschaltwiderständen, lediglich durch Änderung der Feldstärke. Nur auf den ersten Schaltstufen, wo die Motoren in Hintereinanderschaltung bei vollem Felde arbeiten, ist ein Vorschaltwiderstand erforderlich. Von dieser Eigenschaft der Geschwindigkeitsregelung wird man mit Vorteil Gebrauch machen, wenn es sich darum handelt, mit demselben Fahrzeug Linien verschiedener Spannung zu durchfahren. Man fährt dann in Parallelschaltung und schwächt auf der Niederspannungsstrecke das Motorfeld so weit ab, daß man die gewünschte Geschwindigkeit erhält. Aber auch für solche Bahnen, die nur mit einer Linienspannung arbeiten, bedeutet diese Schmiegsamkeit in der Geschwindigkeitsregelung einen großen Vorzug des Wendepolmotors, besonders dann, wenn die Geschwindigkeit innerhalb weiter Grenzen geändert werden soll. Auch da, wo häufig Steigungen mit ebenen Strecken abwechseln, ist die Verwendung des Wendepolmotors angebracht.

Da die Wendepolmotoren auf den meisten Fahrstellen mit geschwächtem Feld arbeiten, ist es möglich, das (beim Anfahren) ungeschwächte Feld hoch zu sättigen, also mit starkem Feld und kleinem Ankerstrom große Anfahrzugkräfte zu erhalten. Die verkleinerten Stromstöße ergeben wieder kleinere Verluste in den Speiseleitungen und Kraftwerken und geringere Spannungsschwankungen im Netz, wodurch die Wagenbeleuchtung angenehmer wird und die Erdströme kleiner ausfallen.

Ist der Wagen mit 4 Motoren ausgerüstet, so können sie entweder in Gruppen von je 2 Motoren, die dauernd in Reihe liegen, geschaltet werden, oder es liegen beim Anfahren alle 4 Motoren in Reihe und werden erst zu zweien und schließlich zu vieren parallel geschaltet. Das ist besonders für Zwischenstadtbahnen von Vorteil, die innerhalb der Städte langsam fahren müssen, und je 2 Motoren dauernd in Reihe liegen lassen können.

Literatur: Schaltung für stufenlose Regelung und Energierückgewinnung (Versuchswagen der Pariser Stadtbahn). EKB 1914, S. 280.

Beispiele üblicher Widerstandsschaltungen (Electr. Railway Journal v. 14. 11. 1914):

1. Reihenwiderstände.
   a) Kurzschlußkontakte in Reihe, Abb. 455 a.
   b) Kurzschlußkontakte parallel, Abb. 455 b.

Die Kontakte in a) haben dauernd, solange der Motor läuft, den Motorstrom zu führen, nach b) dagegen nur solange, bis der nächste Kontakt geschlossen ist. Daher Kontakte in a) größer als in b). Dagegen würde durch ein z. B. hängengebliebenes Schütz in b) der ganze hinter ihm liegende Widerstand kurz geschlossen bleiben, nach a) nur der zugehörige Teilwiderstand.

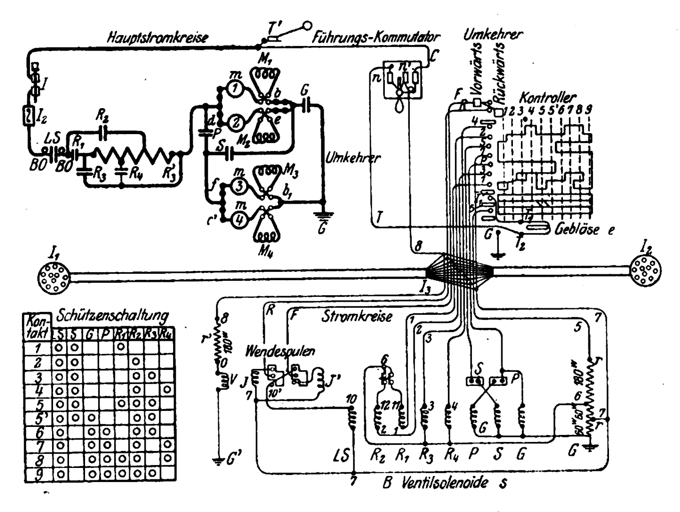
2. Parallelwiderstände, Abb. 455 c.

Bei Reihenwiderständen nach 1. steht für die ersten Kontrollerstellungen der ganze Widerstand für Wärmeausstrahlung zur Verfügung und die Widerstände werden daher kleiner. Dagegen benötigen die Parallelwiderstände nach 2. kleinere Schützkontakte, während die Reihenschaltung nach 1. alle Kontakte für den vollen Motorstrom bemessen muß.

3. Reihen-Parallelwiderstände, Abb. 455 d.

Gegenüber 1. und 2. sind für 5 Stellungen nur 4 Schützen und nur 3 Widerstandsgruppen erforderlich. Dieselben Verbindungen finden Anwendung für Reihenparallelschaltung von 2 oder mehr Motoren. Ausführungsbeispiel für 4 Motoren, je 2 dauernd in Serie, vgl. Abb. 456.

Abb. 455 a bis d.



Kontakt	LS	S	G	P	R_1	R_2	R_3	R_4
1	o	o			o			
2	o	o				o		
3	o	o				o	o	
4	o	o				o		o
5	o	o			o	o	o	
5'	o	o	o			o	o	
6	o		o	o		o	o	
7	o		o	o		o		o
8	o		o	o	o	o		o
9	o		o	o	o	o	o	

Abb. 456. Regelung durch Reihen-Parallelwiderstände.

Literatur: Beschreibung ausgeführter Gleichstrombahnen: Triebwagen Bonn-Königswinter, 2×62 kW, 1000 V. EKB 1912, S. 581. — 55 t-Schmalspur-Lok. Moselhütte, 4×120 kW, 2000 V. EKB 1912, S. 753. — 800 V-Triebwagen Hamburger Hochbahn, 2×75 kW. EKB 1912, S. 317. — 600 V-Pennsylvania-Lok,

2 × 1500 kW. ETZ 1910, S. 241. — 650 V-1500 kW-Lok. Mailand-Varese. EKB 1913, S. 236. — 5 kV-150 kW-Versuchswagen. EKB 1916, S. 175. — 3,0 kV-Chicago-Milwaukee-S. Paul EKB 1918 v. 14. 8.

(787) Einphasenstrom. Den modernen Einphasenbahnmotoren ist die Verwendung eines vom Arbeitsstrom durchflossenen Gleichstromankers und einer Kompensationswicklung am Ständer gemeinsam (Arbeitsachse). Der Arbeitsstrom ergibt im Verein mit dem Erregerfeld das nützliche Drehmoment.

Dem Gleichstrommotor gegenüber ist die Kommutierung des Einphasenmotors schwieriger. Das kommt daher, daß in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen, die sich nicht mehr, wie bei Gleichstrom, im konstanten Treibfeld, sondern in einem Wechselfeld befinden, transformatorisch eine EMK, die sogenannte Transformatorspannung, induziert wird, die die Stromwendung erschwert.

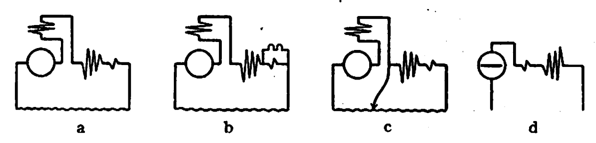


Abb. 457 a bis d. Verschiedene Schaltungen des Einphasenmotors.

Man muß deshalb die Transformatorspannung entweder so niedrig bemessen (kleiner als 2 V), daß noch fast funkenfreie Kommutierung möglich ist, oder durch Verwendung besonderer Hilfsfelder Gegenspannungen erzeugen, die die Transformatorspannung aufheben. Schließlich kann die Transformatorspannung auch in besonderen Widerstandsverbindungen zwischen Anker und Kollektor vernichtet werden.

Im einen Fall erhält man den reinen Serienmotor ohne besondere Hilfsmittel für die Wechselstromkommutierung (Ausführungen der Maffei-Schwarzkopff-Werke, Abb. 457 a), im andern Falle sind je nach der Art der Hilfsfelder eine große Reihe verschiedener Schaltungsanordnungen möglich. Die Siemens-Schuckertwerke und die Maschinenfabrik Örlikon erzeugen ein phasenverschobenes Hilfsfeld nach Behn-Eschenburg und Richter nur an der Wendestelle (Abb. 457 b), während die AEG das Hilfsfeld nach Winter-Eichberg durch Doppelspeisung am ganzen Ständerumfang ausbildet (Abb. 457 c). Schließt man die Arbeitsbürsten kurz, so erhält man als Grenzfall den Repulsionsmotor, den die AEG mit Ankererregung nach Winter-Eichberg (Abb. 457 d) (Blankenese-Ohlsdorf, London-Brighton) die Brown-Boveri & Co. nach Déri mit Doppelbürsten ausführen.

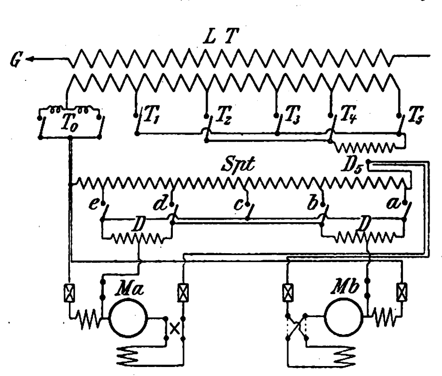


Abb. 458. Prinzip-Schaltungsschema für doppelt gespeiste Motoren. — *LT* Leistungstransf. *Spt* Spannungsteiler. *D* Überschalt-Drosselspulen.

Die angegebenen Hilfsfelder müssen in vielen Fällen, namentlich bei Doppelspeisung in Abhängigkeit von der Drehzahl auch noch geregelt werden und machen derart im Betriebe eine doppelte Regelung, eine Geschwindigkeitsregelung und eine Kommutierungsregelung erforderlich (Abb. 458).

Die Geschwindigkeit wird durch Änderung der totalen Arbeitsspannung geregelt. Sie wird in der Regel der mit Anzapfungen versehenen Sekundärwicklung des Hochspannungstransformators in Verbindung mit Starkstromschaltern oder mittels Hüpfer oder Schützen entnommen. Auch Potentialregler und Bürstenverschiebung werden zur Geschwindigkeitsregelung verwendet.

Alle Einphasenbahnmotoren können direkt oder nach einigen Umschaltungen auch mit Gleichstrom betrieben werden. Wechselstrom-Gleichstromausrüstungen haben namentlich in Amerika Verbreitung gefunden (in Europa: Wien-Baden, EKB 1907, S. 9), sind aber wegen des erhöhten Ausrüstungsgewichtes und wegen der Verzwicktheit der Steuerung nicht zu empfehlen. Auf der Strecke Wien-Preßburg werden die Züge abwechselnd von Gleichstrom- und Einphasenlokomotiven übernommen (EKB 1914, S. 553).

Sollen die Motoren im Gefälle als Generatoren aufs Netz zurückarbeiten, so ist in der Regel eine Umschaltung der Motoren auf Nebenschlußcharakteristik erforderlich (530). (779).

Literatur: Ossanna, Einphasenbahnmotoren für schwere Zugförderung. ETZ 1911, S. 581. — Döry, Einphasenbahnmotoren. Sammlung Vieweg, Braunschweig 1919. — Gerstmayer, Wechselstrombahnmotoren. München 1916.

Beschreibung ausgeführter Anlagen und Lokomotiven. Hamburg-Blankenese-Ohlsdorf: Röthig, Glasers Annalen 1908, Bd. 63. — v. Glinski, Zeitschr. V. D. I. 1908, S. 1581. — Cronbach und Freund, ETZ 1909, und Dietl EKB 1909, S. 601. — Wechselstromlok. d. Preuß. Staatsb. mit 3 Zahnradmotoren zu 260 kW, 6 kV. ETZ 1908, S. 427. — Dessau-Bitterfeld, Heyden, EKB 1909. — 2200 kW, 2-D-1 Lok. EKB 1918 S. 131. — Rjukanbahn. EKB 1912, S. 713. — St. Pölten-Mariazell. EKB 1912, S. 291. —, Jeumont Lok. d. franz. Südbahn. EKB 1911, S. 546. — Mittenwaldbahn. EKB 1913, S. 116. — Riksgränsbahn. EKB 1914, S. 186; 1915, S. 232. — Schlesische Triebwagen (Kleinow). EKB 1915, S. 109. — N. Y. N. H. H. R. EKB 1913, S. 533. — Lötschberg. ETZ 1913, S. 1275. Gotthard-Lok. Schweiz. Bauz. v. 11. 10. 1919. — Lok. auf der Ausstellung Malmö. Z. V. D. I. Bd. 59, S. 557. — Schlesische Gebirgsbahnen ETZ 1919, S. 345.

(788) Drehstrom. Der Drehstrommotor ist seiner Natur nach ein Motor konstanter Geschwindigkeit. Seine Höchstgeschwindigkeit ist an den Synchronismus gebunden. Sein beschränktes Regelbereich und seine Empfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen sind seine Nachteile. Die Vorteile liegen in der Einfachheit der Motoren und ihrer Regelungsausrüstung. Will man diese Vorteile nicht aufgeben, so darf man auch die Regelung durch Widerstand im Läuferkreis nicht verlassen. Die Katarakt-Tunnel-Lokomotive der Great-Northern-Bahn ist ein Ausführungsbeispiel hierfür. Diese Lokomotive besitzt daher nur eine ökonomische Geschwindigkeit bei Synchronismus.

Durch Verwendung der Kaskadenschaltung haben Ganz & Co. auf der Valtellinastrecke 2 bzw. 3 wirtschaftliche Geschwindigkeitsstufen erreicht, während Brown, Boveri & Co. und die Maschinenfabrik Örlikon den Simplon-Lokomotiven durch Verwendung polumschaltbarer Motoren mit Kurzschlußanker 2 bzw. 4 wirtschaftliche Geschwindigkeiten verliehen haben.

Übersynchron (im Gefälle angetrieben) arbeitet der Drehstrommotor ohne besondere Umschaltung auf das Netz zurück.

Als Betriebsspannung hat sich für Drehstrombahnen 3 kV am Fahrdraht und am Motor als normal herausgebildet. Die Kataraktlokomotive verwendet 6 kV am Fahrdraht, einen Leistungstransformator auf der Lokomotive und Niederspannungsmotoren für 500 V.

Literatur: v. Kando, Güterzugslok. der ital. Staatsb. 3 kV. Drehstrom, 1500 kW. Z. d. V. D. I. 1909, S. 1249, 1320. — Brown, Boveri & Co., Simplon-Lok. 3 kV Drehstrom 1600 kW. Z. d. V. D. I. 1909, S. 607. — Giovi Drehstromlok. Electr. World v. 11. 8. 1910 — Kaskade-Tunnel Drehstromlok., 6 kV. Proc. A. I. E. E. 1909, S. 1110. — 2-C-2 Lok. Ital. Staatsb. ETZ. 1920, S. 138.

3. Steuerungs- und Fahrzeug-Ausrüstung.

(789) Schaltwalzen. Schütze. Einzeln laufende Motorwagen und Lokomotiven können mittels gewöhnlicher oder verstärkter Straßenbahn-Schaltwalzen gesteuert werden, solange die gesamte Leistung des Fahrzeuges etwa 3 bis 400 kW nicht übersteigt.

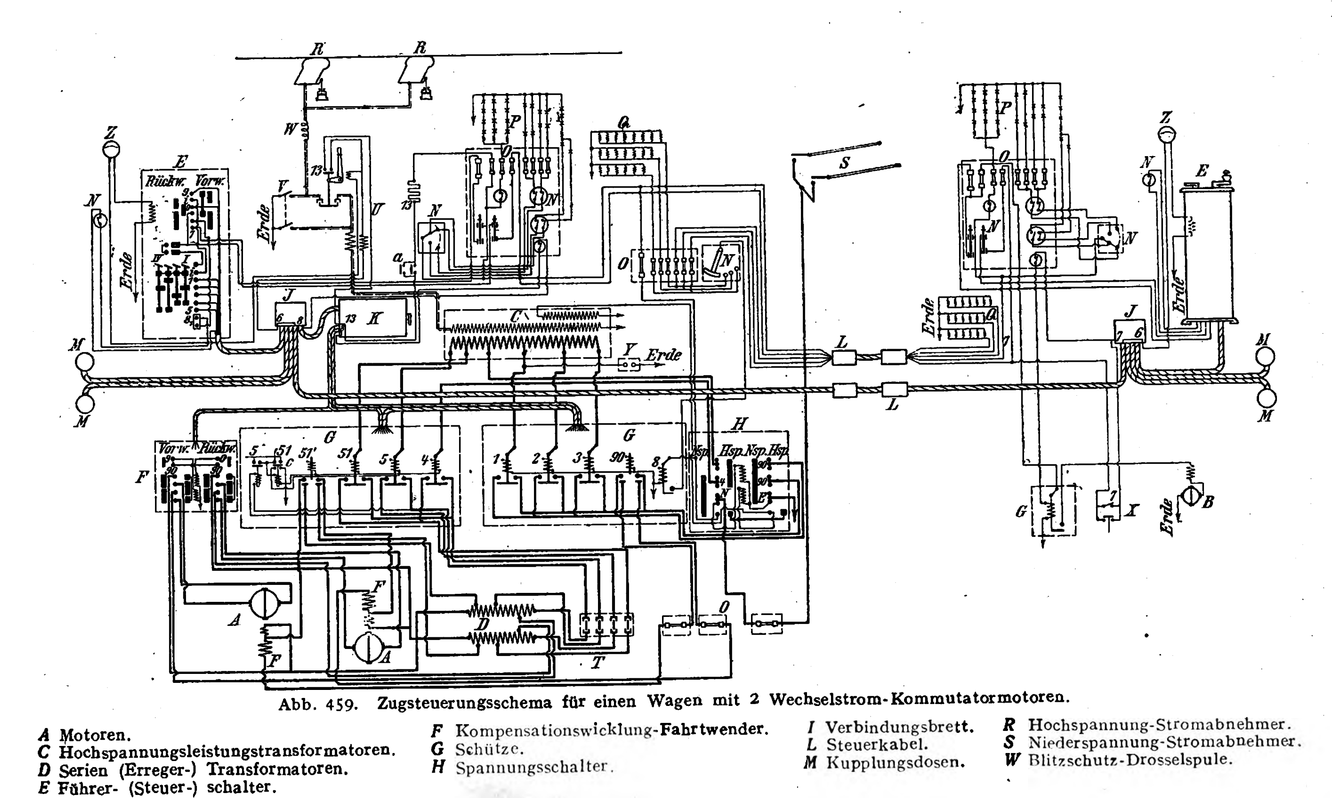


Abb. 459. Zugsteuerungsschema für einen Wagen mit 2 Wechselstrom-Kommutatormotoren.

A Motoren.
C Hochspannungsleistungstransformatoren.
D Serien (Erreger-) Transformatoren.
E Führer- (Steuer-) schalter.
F Kompensationswicklung-Fahrtwender.
G Schütze.
H Spannungsschalter.
I Verbindungsbrett.
L Steuerkabel.
M Kupplungsdosen.
R Hochspannung-Stromabnehmer.
S Niederspannung-Stromabnehmer.
W Blitzschutz-Drosselspule.

Die großen Leistungen im Vollbahnbetriebe aber können nicht mehr unmittelbar geschaltet werden. Man verlegt daher die Schaltung der Arbeitsströme in besondere Apparate, die an beliebigem und geeignetem Platz des Fahrzeuges untergebracht und vom Führerstand aus (mechanisch, durch Druckluft oder elektrisch) betätigt werden. Die Apparate selbst können als Schaltwalzen oder als Einzelschalter (Schützen, Hüpfer) ausgebildet sein. In einigen Fällen sind zur Leistungsregelung von Wechselstromkollektormotoren auch Potentialregler verwendet worden, deren Antrieb vom Führerstand aus bedient wurde.

Die mittelbaren Steuerungen sind überdies in den Fällen notwendig, in denen Zugsteuerung gefordert wird, wo also ein aus mehreren Fahrzeugen gebildeter Zug von einer Stelle aus gesteuert werden soll. Bei der elektrischen Zugsteuerung werden die Fahrzeuge durch Steuerstromleitungen, die die vom Fahrschalter beeinflußten Steuerströme führen, miteinander verbunden.

Abb. 456 zeigt die Schaltung für Gleichstromzugsteuerung mit Reihen- und Parallelschaltung der Motoren und Widerstandsstufen. Abb. 459 die elektrische Zugsteuerung eines Einphasenhochspannungstriebwagens und Abb. 460 den Schaltplan einer 1000 kW-Einphasenlokomotive mit Einzelsteuerung und von Hand bedienter Starkstromschaltwalze.

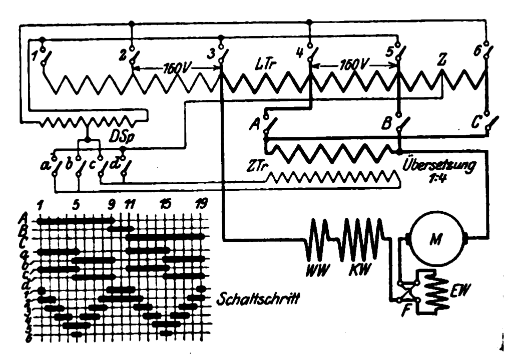


Abb. 460. Schaltplan einer Einphasenlokomotive.

Literatur: Ein anschauliches Bild sämtlicher für preußische Vollbahnlok. verwendeten Steuerungssysteme gibt Wachsmuth, Glasers Annal., Bd. 79, Heft 10—12; Bd. 80, Heft 1—2, Referat ETZ 1918, S. 314.

(790) Stromabnehmer. Die überwiegende Zahl von Straßenbahnen mit Oberleitung verwenden den Rollenstromabnehmer, der besseren Kontakt gibt als der Bügel und noch für etwa 300—400 A ausreicht, gegen 200—250 A beim Bügel. Die Abspannung des Fahrdrahtes aber muß für die Rolle genauer sein und erfordert in Kurven und Weichen eine erhöhte Anzahl Befestigungspunkte. Lebensdauer der Bügel-Schleifstücke etwa 10—15000 km, unter günstigen Bedingungen bis 30000 km.

Für Vollbahnbetrieb kommen in der Regel die Pantographen- oder Scherenstromabnehmer (Abb. 461) zur Verwendung, Bügel mit scherenartigem Traggestänge, die besonders für hohe Geschwindigkeiten (130 km/h) geeignet sind. Die Wirkung des Windes auf die Schere ist gering, weil der Wind die eine Scherenstange niederdrückt, die andere zugleich anhebt. Bügelstromabnehmer für hohe Geschwindigkeiten müssen Windflügel zur Kompensation des Winddruckes erhalten.

Das Schleifstück wird durch Spiralfedern in der senkrechten Lage festgehalten und durch den Druck, den es gegen den Fahrdraht ausübt, aus der senkrechten Lage abgelenkt. Die Schleifstücke sind in der Regel aus Aluminium von V-förmigem Querschnitt und leicht auswechselbar. Wo es die klimatischen Verhältnisse zulassen, sind sie mit einer Rille versehen, die mit dickflüssigem Fett ausgefüllt ist. Die Laufzeit der Aluminiumschleifstücke beträgt im Mittel etwa 5—10000 km. Nutzbare Breite etwa 0,7—1,5 m, normal etwa 1 m.

Valtellina (3 kV Drehstrom) und Butte-Anaconda (2,4 kV Gleichstrom) verwenden der hohen abzunehmenden Stromstärke wegen auf Kugeln oder Rollen gelagerte Walzen, Simplon dreieckförmige Bügelrohre aus Messing (Lebensdauer 8000 km, Abnützung des Fahrdrahtes 0,3—0,4 mm bei 80000 Bügelbestreichungen).

Stromabnehmer müssen gut isoliert sein, sollen Wechsel der Fahrtrichtung gestatten, dürfen, um den geringen Unebenheiten des Fahrdrahtes auch bei großer Geschwindigkeit folgen zu können, nicht zu Schwingungen neigen und müssen deshalb kleines Trägheitsmoment des eigentlichen Schleifstückes, bezogen auf den Drehpunkt, besitzen.

Stromabnehmer für dritte Schiene vgl. (797).

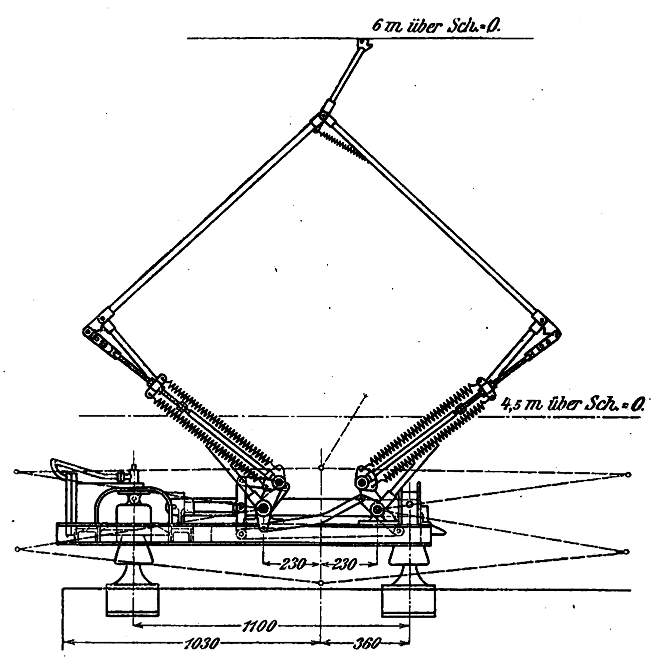


Abb. 461. Scherenstromabnehmer der AEG.

(791) Hochspannungsausrüstung für Wechselstrom. Die Hauptausschalter der Fahrzeuge für Wechselstromhochspannung werden als Ölschalter ausgebildet und von Hand oder bei Zugsteuerungen elektrisch oder durch Druckluft bedient. Zur Vermeidung von Überspannungen empfiehlt es sich, zur Dämpfung eine Widerstandsvorstufe vorzusehen.

Die Hochspannung führenden Teile werden oft in einer besonderen Hochspannungskammer untergebracht. Die Tür des Hochspannungsraumes ist zuweilen durch den Stromabnehmer derart verriegelt, daß sie nur bei niedergelegtem Bügel geöffnet werden kann. Bei geöffneter Tür der Hochspannungskammer sollen ferner durch einen Erdungsschalter alle in der Kammer befindlichen Apparate geerdet sein.

Die Hochspannungskammer enthält in der Regel den Ölschalter, den Stromwandler für die Instrumente und Apparate, eine Blitzschutz-Drosselspule und eventuell noch einen Blitzableiter.

(792) Einrichtungen für Nebenzwecke, Heizung, Beleuchtung, Luftpumpe usw. In Gleichstrom-Niederspannungsfahrzeugen kann der Strom für Nebenzwecke unmittelbar hinter dem Hauptausschalter abgezweigt werden. In Gleichstrom-Hochspannungsfahrzeugen dagegen ist die Aufstellung eines besonderen umlaufenden Spannungswandlers (Dynamomotor), der Gleichstrom-Niederspannung für Nebenzwecke abgibt, empfehlenswert. Auf Wechselstromfahrzeugen kann Niederspannung für Nebenzwecke entweder einem besonderen Hilfstransformator oder einer Anzapfung eines vorhandenen Regelungs- oder Leistungstransformators entnommen werden.

III. Speisung und Verteilung.

1. Stromzuführungssysteme.

(793) Allgemeines. In den mit Niederspannung arbeitenden Gleichstrombahnen war man mit der Erhöhung des Zuggewichtes und der Leistung zu so großen dem Fahrzeug zuzuführenden Stromstärken gelangt, daß man, wo ein eigener Bahnkörper vorhanden war, von der bei Straßenbahnen gebräuchlichen Form der Oberleitung des notwendigen großen Querschnittes des Fahrdrahtes wegen Abstand nahm und zur dritten Schiene überging. Aber diese von Erde isolierte und unter Spannung stehende Schiene bildet eine stete Gefahr für Menschen und Tiere und erschwert die Unterhaltung des ganzen Bahnkörpers. Bei Entgleisungen kann die dritte Schiene zerstört werden und die Betriebsstörung noch vergrößern, während heftige Schneefälle, Eis- und Reifbildung die Stromabnahme erschweren. Einen schwachen Punkt bilden auch die Kreuzungen und Weichen, an denen Unterbrechungen in der Führung der dritten Schiene bis zu 50 m Länge notwendig werden. Um Steckenbleiben des Zuges zu verhindern, ist man oft gezwungen gewesen, die dritte Schiene an dieser Stelle nach oben zu verlegen (New York Central Ry.). Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus kann die dritte Schiene für z. B. kürzere Vorortstrecken mit dichtem Zugverkehr Verwendung finden (Hochbahn in Berlin und Hamburg 750 V; — Berlin-Großlichterfelde; Paris-Orléans usw.). Für Fernbahnen aber macht die für die Schiene zulässige Spannung von etwa 1—1,5 kV einen vollbahnartigen Betrieb mit dieser Art der Stromzuführung unwirtschaftlich (776), auch dann noch, wenn man mit der Spannung der dritten Schiene bis 2,4 kV geht, wie dies neuerdings bei der New York Central und bei der Michigan-Bahn der Fall ist (797). Mit der Entwicklung der Wechselstrombahnmotoren und der Verwendung hoher Spannungen ist daher auch die Ausbildung eines Stromzuführungssystems, der sogenannten Kettenaufhängung, Hand in Hand gegangen. Dieses System gestattet nicht nur, Spannungen von 20 kV mit einem verhältnismäßig schwachen Fahrdraht dem Fahrzeug zuzuführen und selbst die größten Leistungen mit relativ kleinen Stromstärken zu beherrschen, sondern besitzt auch erhebliche Vorteile für die bei Vollbahnen vorkommenden hohen Geschwindigkeiten, gibt den Bahnkörper der dauernden Besichtigung und Unterhaltung frei und vermeidet Komplikationen an Weichen und Kreuzungen. Entwicklung der Stromzuführungseinrichtungen, EKB 1912, S. 673.

(794) Einfache Form der Oberleitung. Für Straßenbahnen wird in der Regel die einfache Aufhängung des Fahrdrahtes über Wagenhöhe und in angenäherter Schienenmitte mit Hilfe von Isolatoren und Querdrähten verwendet.

Der Fahrdraht besteht aus hartgezogenem Kupferdraht und wird mit etwa 6—8 kg/mm² gespannt. Auf den geraden Strecken betragen die Abstände zwischen den Aufhängungspunkten in Richtung des Fahrdrahtes etwa 25—35m. Hierbei ist der Durchhang der Leitungen noch derart begrenzt, daß die Rollen- oder Bügelstromabnehmer bei den mäßigen Geschwindigkeiten der Straßenbahnen den verschiedenen Höhenlagen ohne Nachteil folgen können.

Der Querschnitt des Fahrdrahtes beträgt meist 50 mm² und ist kreisförmig oder er besitzt eine rillen- oder lemniskatenähnliche Form, die eine günstigere Befestigung (klemmen statt löten) und eine breitere Kontaktfläche bei gleicher Masse gewährt. Zickzackverlegung (nur für Bügel) vgl. (795).

Eine einfache Form der Oberleitung kann auch für Voll- und Überlandbahnen noch verwendet werden, solange die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht zu hoch ist (Schwedische Staatsbahnen, Giovi, Mont-Cenis).

(795) Ketten-(Vielfach-)aufhängung. Die bei den Straßenbahnen übliche Einfachaufhängung des Fahrdrahtes ist für große Geschwindigkeit (über etwa 50 km/h) nicht geeignet, weil sich der Stromabnehmer an den Aufhängepunkten des Fahrdrahtes stößt und überdies dem stark durchhängenden Draht nicht immer folgen kann und daher abschlägt. Das kann zu Schwingungen des Stromabnehmers oder zu Drahtbruch Veranlassung geben. Für Vollbahnbetrieb, besonders aber für Schnellbetrieb ist daher eine biegsame und nachgiebige Konstruktion erforderlich, die trotz großer Spannweiten den Fahrdraht in möglichst unveränderlichen Höhe hält.

Man erreichte dies durch Aufhängung des Fahrdrahtes in möglichst vielen Punkten an besonderen Tragseilen oder Ketten. Eine solche Anordnung wurde zum ersten Male von der AEG für die Spindlersfelder Anlage ausgeführt. Um die durch Temperaturschwankungen verursachten Längenänderungen auszugleichen, wurden die Fahrdrähte von Hand nachgespannt, was eine geringe Schrägstellung der Hängedrähte ergab.

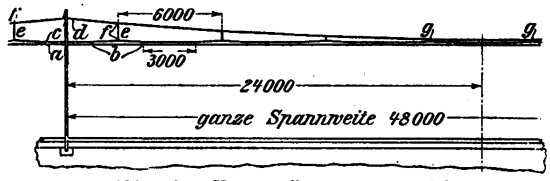


Abb. 462. Kettenaufhängung der SSW.

Um die Verzerrung der Hängedrähte zu vermeiden, verwenden SSW außer dem Kettendraht und dem Fahrdraht noch einen Hilfstragdraht. Dieser ist am Kettendraht mittels gelenkiger Hängedrähte befestigt, während der Fahrdraht mittels leicht gleitender Schleifen am Hilfsdraht hängt (Abb. 462). Die in der Längsrichtung verschiebbaren Schleifen gestatten dann ein Nachspannen des Fahrdrahtes bei senkrecht verbleibenden Hängedrähten. Aber auch bei dieser Anordnung entstehen noch Höhenänderungen des Fahrdrahtes, solange die Kette nicht selbst geregelt wird. Die AEG hat daher die Aufhängepunkte der Kette verschiebbar gemacht und über der Kette eine Hilfsleitung angeordnet, die auch die Kette selbst nachspannt. Bei Temperaturverminderung z. B. zieht sich die Kette zusammen, zugleich aber auch der Hilfsdraht, der die Befestigungspunkte der Kette wieder einander nähert. Ein Anheben des Fahrdrahtes findet daher nicht statt. Zum Nachspannen werden in Entfernungen von etwa 800—1000 m an den über Rollen geführten Stahlseilen entsprechende Gewichte angeordnet. Das Gewicht ist der Zugspannung des Drahtes entsprechend zu wählen. Anlage Dessau-Bitterfeld EKB 1911, S. 468; ETZ 1911, S. 609.

Einige Konstruktionen verwenden zwei Ketten statt einer (N. Y. N. H. Rly. — London-Brighton). Das Tragseil kann auch zugleich als Blitzschutzseil dienen (N. Y. N. H. H. R.). Amerikanische Ausführungen EKB 1915, S. 37; 1916, S. 169.

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Abnutzung des Stromabnehmer-Schleifstückes wird die Leitung derart im Zickzack verlegt, daß die ganze nutzbare Breite der Bügel (794) den Fahrdraht bestreicht; im Mittel etwa 0,5 m größte Abweichung aus der Gleismitte.

Für den Fahrdraht wird in der Regel hartgezogenes Kupfer von 36—38 kg/mm² Zerreißfestigkeit, für das Kettenwerk Siliziumbronze oder Stahlseil verwendet. Das Tragseil der Bitterfelder Ausrüstung besteht aus verzinktem Stahlseil von 75 kg/mm² Zerreißfestigkeit, die Hängedrähte aus verzinktem Stahldraht von 40 kg/mm² Zerreißfestigkeit.

Fahrdraht querschnitt aus konstruktiven Rücksichten meist 100 mm², in der Regel 8-förmig (794). Die Spannweite kann 50—100 m betragen.

Als Tragwerk kommen je nach den örtlichen Verhältnissen Portalbrücken, Gittermasten mit Ausleger oder Queraufhängung und Holzmaste in Betracht. Die Fahrdrahthöhe beträgt $5\frac{1}{2}$—7 m. Die Isolation wird oft doppelt genommen. Die Isolatoren sind durchweg hintereinander zu schalten und bestehen fast ausschließlich aus homogenem Porzellan, das frei von Spannung sein muß.

Zum Schutz gegen herabfallende Hochspannungsdrähte werden oft Erdungsbügel verwendet, welche den Stromzuführungsdraht in Form einer Schleife umgeben und bei Bruch eines Konstruktionsteiles der Aufhängung die ganze Teilstrecke erden.

(796) Festigkeitsrechnungen. Für den Durchhang eines Drahtes von der Dichte δ kg/cm³ der zwischen zwei Punkten von der Entfernung a m aufgehängt und mit p **kg***/cm² gespannt ist, gilt $f = a^2\,\delta/8\,p$. Für gewöhnlichen Arbeitsdraht (Kupfer $\delta = 0{,}0089$) eine Entfernung der Stützpunkte von 40 m und eine Spannung von rd. 7 kg*/cm² ergibt sich demnach der Durchhang zu etwa 0,25 m.

Eine Temperaturänderung von $\Delta t°$ ergibt eine Änderung der Spannungsbeanspruchung des Drahtes von angenähert $= \vartheta\,E\,\Delta t$ kg*/mm². Darin kann für hartgezogenes Kupfer der Temperaturkoeffizient $\vartheta = 0{,}0000165$, der Elastizitätsmodul $E = 13000$ kg*/mm² gesetzt werden. Unterste Temperaturgrenze $= -20°$ C. (VDE).

Winddruck. Nach den Normalien des VDE ist eine Belastung von 125 kg*/m² senkrecht getroffener ebener Fläche, bzw. von 87,5 kg*/m² zylindrischer Oberfläche (entsprechend 0,7 des Durchmessers) einzusetzen.

Eislast. Die deutschen Normalien für Freileitungen schreiben $0{,}015\,s$ kg/m vor, wenn s den Querschnitt in m² bedeutet. — Für die Bitterfelder Ausrüstung wurde eine zylindrische Eiskruste, deren äußerer Durchmesser gleich dem doppelten des Fahrdrahtes ist und ein spez. Gewicht des Eises von 0,9 angenommen. Die höchst zulässige Beanspruchung darf nach den Vorschriften des VDE 12 kg*/mm² nicht übersteigen.

Die Vorschriften des E.V. in Wien verlangen fünf fache Sicherheit und schreiben als unterste Temperaturgrenze, die der Rechnung zugrunde liegen soll, $-25°$ C sowie die Annahme von 150 kg Winddruck senkrecht getroffener Fläche vor.

Der Bitterfelder Ausrüstung (EKB v. 14. 8. 1911) wurde für die folgenden Annahmen eine dreifache Sicherheit zugrunde gelegt:

a) Temperaturänderungen von $-20°$ bis $+40°$, eine gleichzeitige Belastung durch das Konstruktionsgewicht und durch Winddruck.

b) Temperaturänderungen von $-5°$ bis $0°$ C und eine gleichzeitige Belastung durch das Konstruktionsgewicht, durch Eislast und durch Winddruck von 50 kg*/m².

(797) Dritte Schiene (793). Über die Lage der dritten Schiene zum Gleis bestehen keine Vorschriften. Man legt sie neuerdings in der Regel neben das Gleis in Entfernungen von $a = 500$ bis 750 mm und $b = 70$ bis 200 mm (Abb. 463).

Die dritte Schiene wiegt etwa 20—75 kg/m (Hamburger Hochbahn 40 kg/m) und wird durch Isolatoren in Abständen von etwa 1,5—5 m getragen. Die Isolatoren bestehen aus gebranntem Ton oder Hartgummi, neuerdings Porzellan (N. Y. Central, Hamburger Hochbahn), seltener aus Holz. Die Stromabnehmer werden entweder durch ihr Eigengewicht oder durch Federn gegen die Schiene gedrückt. Die Stromabnahme erfolgt meist von oben, in den neuesten Ausführungen

jedoch von unten (N. Y. C., Hamburger Hochbahn). Die Schiene kann in diesem Falle gegen zufällige Berührung besser geschützt werden, und die Isolatoren werden durch die Stromabnehmerschuhe entlastet. Die Leitfähigkeit des für die dritte Schiene verwendeten Stahles beträgt etwa $^1/_7$ derjenigen des Kupfers (gewöhnlicher Schienenstahl Leitfähigkeit $^1/_{11}$, reines Eisen $^1/_5$ des Kupfers. Das Material soll weiches Eisen sein von geringem Kohlenstoff- und Mangangehalt und hoher elektrischer Leitfähigkeit. Durch die Verwendung besonders kräftiger Schienen kann die Anordnung kupferner Verstärkungsleitungen erspart werden (New Yorker und Brooklyner Untergrundbahn 74 kg/m). Vorschläge zur Vereinheitlichung ETZ 1908, S. 655. — 2400 V-Anordnungen EKB 1916, S. 171. — Hamburger Hochbahn EKB 1912, S. 324. — Pariser Vorortbahnen EKB 1913, S. 545.

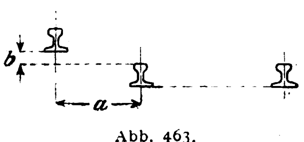


Abb. 463.
Anordnung der dritten Schiene.

(798) Unterirdische Stromzuführung. Von diesen Systemen hat nur das Schlitzkanalsystem Bedeutung erlangt, und zwar für Bahnen in den vornehmen Straßen großer Städte, in denen die Oberleitung untersagt wurde (SSW in Budapest ist darin vorbildlich gewesen).

(799) Schienenverbindungen. Die Oberleitung ist für Gleichstrom- und Wechselstrom auf dem europäischen Festland in der Regel einpolig, in England und in Amerika öfters doppelpolig zur Vermeidung von Erdströmen (z. B. Washington und Pittsburg). Als Rückleitung werden die Schienen mit elektrisch leitend verbundenen Stößen verwendet. Die Laschenverbindung genügt nicht als elektrische Verbindung. Man verwendet Kupferverbindungsstücke, die die Lasche überbrücken. Der nützliche Querschnitt der Verbindung beträgt 50 bis 100 mm², ihre Länge im Mittel 300 mm. Die Schiene wird daher bei einer Länge von 12 m angenähert um 30% virtuell verlängert (bei 35 kg/m Schienengewicht).

Die Versuche, endlose Schienen durch elektrische Lötung (Goldschmidtsches Thermitverfahren) oder durch umgeschmolzene Muffen herzustellen, haben gute Resultate in elektrischer Beziehung ergeben. Um der endlosen Schiene aber auch freie Ausdehnung zu gestatten, schweißt man nur etwa 8—10 Schienenlängen zusammen und verlascht die so gewonnenen Längen wie gewöhnlich (vgl. Aluminothermische Schienenschweißungen, EKB 1909, S. 489).

Widerstand der Schienen und Schienenverbindungen vgl. (802). Typen und Ausführungsbeispiele für Schienenverbindungen vgl. Parshall & Hobart, Railway Engineering, S. 273.

Literatur: Einphasen-Streckenausrüstung in Bitterfeld EKB 1911, S. 1418; ETZ 1911, S. 609; — Dreiphasen-Strecke des Kaskaden-Tunnels, Proceed. A. I. E. E. 1909, S. 1410; — Overhead Catenary Construction, Electr. World 1908, S. 998; — Fahrdrahtaufhängung und Oberleitungsnormalien für 500 V Gleichstrom und für 11 und 22 kV Drehstrom Fernleitung Electr. Railway J. 1909, S. 591.

2. Verteilungsnetz.

(800) Allgemeines. Die Verteilungspunkte werden mit Rücksicht auf den zulässigen Spannungsabfall gewählt. Die Stromverteilung wird an Hand des Fahrplanes und der Fahrdiagramme nach den für die Berechnung von Leiternetzen gültigen Regeln ermittelt. (Vgl. [642 bis 652] und Herzog und Feldmann, Berechnung der Leitungsnetze).

Gleichstrombahnen werden entweder mit Leitungen gespeist, die von eigenen Gleichstromwerken unmittelbar zu den Verteilungspunkten führen, oder durch Unterwerke, die längs der Strecke verteilt sind und in der Regel hochgespannten Drehstrom in Gleichstrom umformen.

Drehstrombahnen erfordern in der Regel ruhende Transformatoren zur Herabminderung der Verteilungsspannung, sobald diese etwa 3—6 kV

überschreitet. Einphasenbahnen können noch mit 20—25 kV unmittelbar gespeist werden und zwar aus Einphasen- oder auch aus Drehstromkraftwerken. Eine gleichmäßige Belastung aller 3 Phasen wird zwar niemals zu erreichen sein, aber es ist oft möglich, die Belastungsschwankungen der Phasen auszugleichen. Auf der Stubaitalbahn hängt sogar Licht und Bahn an derselben Phase der Drehstromgeneratoren, und es ist trotzdem mit Hilfe eines Reihentransformators gelungen, die Belastungsstöße beim Anfahren im Lichtnetz aufzuheben.

Man kann auch die Bahnstrecke in $3n$ Abschnitte einteilen, die an den 3 Phasen hängen, oder in $2n$ Abschnitte und den Drehstrom mit Hilfe der Scottschen Schaltung (339) in Zweiphasenstrom transformieren[1]. In diesen beiden Fällen müssen aber die verschiedenen Phasen angehörenden Fahrdrähte durch tote Strecken voneinander getrennt und isoliert werden. Wenn es sich um die Errichtung eigener Bahnkraftwerke handelt, sollten nur Einphasengeneratoren in Verbindung mit einphasiger Verteilung Verwendung finden.

Die Höhe der gewählten Verteilungsspannung muß an Hand des Belastungsdiagrammes und des Spannungsabfalles auf ihre Richtigkeit nachgeprüft werden.

Für ausgedehnte Netze sind Speiseleitungen mit etwa 30—80 kV Übertragungsspannung nicht mehr ungewöhnlich.

Die Frequenz ist für Drehstrombahnen (Italien) und neuerdings auch für Einphasenbahnen (Preußen, Bayern, Baden, Österreich, Schweiz, Schweden) einheitlich zu 15—16$^2/_3$ Per/s angenommen worden. Zahlreiche Einphasenbahnen haben auch mit 25 Per/s (Blankenese-Ohlsdorf, London-Brighton, St. Pölten-Mariazell, New York-New Haven und Hartford) und Kleinbahnen (St. Avold, ETZ 1911, S. 11, Stubaital) sogar mit 40—50 Per/s im Anschluß an bestehende Kraftwerke sehr gute Resultate ergeben. Zur Frage der Frequenz s. Eichberg, ETZ 1909, S. 623; Pichelmayer, EKB 1911, S. 127.

(801) Der **Spannungsabfall** ergibt sich aus den Belastungsdiagrammen der Linie und ist für die ungünstigste Verteilung der Wagen auf der Strecke aus den Stromstärken und den Widerständen zu berechnen.

Für Gleichstromstraßenbahnen soll die gesamte Spannungsschwankung an den Motoren nicht mehr als 20—30 % betragen. Dabei ist darauf zu achten, daß die Spannung zwischen zwei Punkten der Schienen mit Rücksicht auf die elektrolytischen Wirkungen höchstens 7 V betragen darf. Nur für Gleichstrombahnen mit eigenem Bahnkörper und gut isolierenden Schwellen kann um etwa 50 % höher gegangen werden (vgl. Erdstromnormalien ETZ 1910, S. 491; ETZ 1911, S. 511 u. 1032).

Strom und Spannung der Schienen an einem gegebenen Punkte sind Funktionen der Entfernung des Punktes vom Speisepunkte, der Schienenwiderstände und der Übergangswiderstände von Schiene zu Erde (vgl. Isolationswiderstand 805). Über den Verlauf der Erdströme und die Gefahrzone vgl. Herzog und Feldmann, S 425 und Normalien des VDE, §§ 2—5 der Vorschriften zum Schutz der Gas- und Wasserleitungsröhren usw. Bericht des Schweiz. ETV, ETZ 1920, S. 48, 261. Über die Messung von Erdstromdichten vgl. EKB 1909, S. 226.

Erreicht der Spannungsabfall in den Schienen streckenweise eine unzulässige Höhe, so kann er vermindert werden durch die Verwendung von isolierten Rückspeisekabeln und Zusatzmaschinen (sogenannte negative Booster). Der entfernte Schienenstrang erhält dann das Potential der negativen Sammelschienen im Kraftwerk, und die zu schützenden Rohrmassen werden negativ gegen die Schienen, so daß sie bei eintretender Elektrolyse die Kathode bilden. Die Gesichtspunkte für die Anordnung und Berechnung der negativen Rück-

[1] Rotterdam-Haag, EKB 1910, S. 501 und Z. d. V. D. I. 1910, S. 1750.



speisekabel sind die gleichen wie für die positiven Speiseleitungen (vgl. Herzog und Feldmann II, S. 431).

In Wechselstromkreisen treten an die Stelle der Widerstände die Scheinwiderstände, die geometrisch addiert werden müssen. Sie hängen von der angenommenen Stromverteilung ab und müssen geändert werden, wenn die Stromverteilung nicht zutrifft.

Der Spannungsabfall für Wechselstrombahnen kann für rohe Rechnungen in den Schienen etwa 5mal und in der Oberleitung angenähert 3mal (bei 15 Per/s) größer angenommen werden als für Gleichstrom bei denselben Verhältnissen.

Die größten Spannungsschwankungen am Motor sollen 30 % nicht übersteigen. Dagegen kann der Spannungsabfall in den Schienen mit Rücksicht auf die verminderte elektrolytische Wirkung des Wechselstromes 50—100 V und bei gut isolierten Schwellen auch 150 V betragen. Vorschriften dafür gibt es nicht.

Änderungen des Schienenquerschnittes, der Spurweite und der Fahrdrahthöhe haben nur geringen Einfluß auf den Spannungsabfall, weil diese Größen unter dem log stehen (803) und für normale Ausführungen auch nur sehr wenig veränderlich sind.

Dagegen wächst der Spannungsabfall bei Einphasen- und Drehstrom mit der Frequenz, und zwar tritt dieses Wachsen bei großen Leiterquerschnitten, wo die induktiven Spannungskomponenten die Ohmschen überwiegen, viel stärker hervor, d. h. bei höheren Frequenzen kann die Verwendung großer Querschnitte den Spannungsabfall nur unbedeutend verringern. Es wird daher bei Einphasen- und Drehstrom besonders bei höheren Frequenzen immer zweckmäßig sein, einen Fahrleitungsdraht vom Mindestquerschnitt (gew. 50 mm²; für Vollbahnen sind 100 mm² gebräuchlich) zu verwenden und den Spannungsabfall durch die Wahl einer entsprechend hohen Spannung und einer genügenden Anzahl von Speisepunkten in zulässigen Grenzen zu halten[1]). Der gesamte Spannungsabfall ist also bei gegebener Stromstärke und Frequenz nur durch den Fahrdrahtquerschnitt bestimmt und kann für Überschlagsrechnungen an Hand der folgenden Tabellen, die für mittlere Werte, und zwar für 6 m Fahrdrahthöhe und 32 kg/m schwere Schienen gelten, berechnet werden. Der Abstand der beiden Fahrdrähte voneinander ist bei Drehstrom zu 1 m angenommen:

Spannungsabfall in V/km für 1 A bei Normalspur[1])

Frequenz	Einphasenstrom				Drehstrom			
	$q = 50$	60	80	100 mm²	50	60	80	100 mm²
0 Per/s	0,39	0,33	0,26	0,21	0,44	0,37	0,28	0,22
15 „	0,46	0,42	0,36	0,33	0,49	0,42	0,35	0,31
25 „	0,57	0,53	0,48	0,45	0,57	0,50	0,43	0,40
50 „	0,85	0,82	0,79	0,76	0,79	0,74	0,69	0,57

Für eiserne Fahrdrahtleitung und Schienenrückleitung von 45 kg/m können folgende überschlägige Werte für den gesamten Spannungsabfall für 1 Ampere angenommen werden:

Frequenz	Fahrdraht		
	50 mm²	100 mm²	150 mm²
0 Per/s	2,62 V/km	1,31 V/km	0,88 V/km
15 „	6,60 „	4,51 „	3,65 „
25 „	7,64 „	5,25 „	4,23 „
50 „	9,40 „	6,60 „	5,42 „

(Kummer, E & M, Wien, 17. 2. 1918.)

[1]) Vg. Huldschiner, ETZ 1910, S. 1206; Lichtenstein, ETZ 1907, S. 621.

Zur Verminderung des Spannungsabfalles in den Schienen können wie bei Gleichstrom Rückspeisekabel verwendet werden, die jedoch an Stelle der Zusatzmaschinen Reihentransformatoren (Saug- oder Boostertransformatoren) erhalten. (Vgl. DRP 179519 und 193369.)

(802) Gleichstromwiderstände. Der Gesamtwiderstand des Stromkreises, der in die Berechnung des Spannungsabfalles eingeht, besteht bei Gleichstrom aus den einfachen Ohmschen Widerständen der Fahrdrahtleitung und der Schienenrückleitung, sofern keine besondere Rückleitung vorgesehen ist.

Der Ohmsche Widerstand beträgt

$$\frac{1000}{\chi \cdot q} \; \Omega/\text{km},$$

wenn q den Querschnitt in mm² bedeutet und χ die Leitfähigkeit für Kupfer = 57 und für Weicheisenschienen = 8 gesetzt wird. Weil das spez. Gewicht des Eisens ebenfalls angenähert = 8 ist, ergibt sich für den Schienenwiderstand angenähert

$$\frac{1}{g} \; \Omega/\text{km},$$

wenn g das Gewicht der Schiene in kg/m bedeutet.

Für die Schienenverbindungen kann eine mittlere Länge von 30 cm und ein Mindestquerschnitt von 50 mm² angenommen werden. Der Übergangswiderstand hängt von der Sauberkeit der Ausführung ab, steigt in der Regel mit der Zeit an und kann im Mittel zu 0,0001 Ω für den Kontakt eingesetzt werden. Danach beträgt z. B. der Widerstand für 1 km einer einfachen Schiene von 53 kg/m und 12 m Länge[1])

reiner Schienenwiderstand $^1/_{35}$	= 0,029
1000 : 12 = 84 Schienenverbindungen von 30 cm Länge	0,0084
2 × 84 Übergangswiderstände zu 0,0001 Ω	0,0168
	0,054 Ω/km.

Die amerikanische Praxis berücksichtigt den gesamten Schienenwiderstand durch einen Zuschlag von im Mittel 40 % zum Widerstand des Fahrdrahtes. Indessen ist in den Fällen, wo der Spannungsabfall in den Schienen einen vorgeschriebenen Wert nicht überschreiten darf, eine mindestens angenäherte Berechnung zu empfehlen.

Meßwagen zur Bestimmung der Schienenstoßwiderstände, EKB 1908, S. 568.

(803) Wechselstromwiderstände. Der Scheinwiderstand der durch die Oberleitung und Schienenrückleitung gebildeten Masche umfaßt den wirksamen Widerstand und die totale Reaktanz der aus Oberleitung und Schienen gebildeten Schleife. Laufen mehrere Fahrdrähte, Speiseleitungen oder Gleise parallel, so sind deren Scheinwiderstände geometrisch zu addieren.

Der wirksame Widerstand R_w ist gleich dem Ohmschen durch Gleichstrommessung ermittelten Wert R_g, vermehrt um den Skin-Effekt A_s und — in magnetischen Materialien (Stahlschienen) — auch noch um einen den Hystereseverlusten A_H entsprechenden Betrag also

$$R_w = \frac{I^2 R_g + A_s + A_H}{I^2},$$

wenn I die Stromstärke bedeutet.

Der wirksame Widerstand ist daher von der Form des Leiters, von den magnetischen Eigenschaften des Materials und von der Höhe der Magnetisierung des Leiters, d. h. von der Stromstärke abhängig.

---

[1]) Herzog u. Feldmann, S. 412.

Für Kupfer- und Aluminiumleiter kann der Skineffekt für die bei Bahnen verwendeten Frequenzen vernachlässigt werden.

In den Schienen schwankt der Wert $K = R_w/R_g$ bei Stromstärken von 50 bis 600 A und 25 Per/s zwischen 2 und 10 für 25 bis 35 kg schwere Schienen. Man kann schätzungsweise mit einem Wert von $K = 7$ für 25 Per/s und $K = 5$ für 15 Per/s rechnen.

Nach Dawson ist für 25 Per/s

$$R_w = \frac{13}{u},$$

wenn u den Umfang des Schienenprofils in cm bedeutet.

Die gesamte Induktanz für eine beliebige Anzahl paralleler Leiter, in denen die Summe der in den Leitern

$$1,\ 2,\ 3,\ \ldots\ldots\ (p-1),\ p,\ (p+1),\ \ldots\ldots\ (n-1),\ n$$

zugeführten oder positiven Ströme

$$\Sigma(+I) = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_{(p-1)} + I_p + I_{(p+1)} + \cdots I_{(n-1)} + I_n$$

gleich ist der Summe der in den Leitern

$$\mathrm{I},\ \mathrm{II},\ \mathrm{III},\ \ldots\ (P-1),\ P,\ (P+1),\ \ldots\ (N-1),\ N$$

abgeführten oder negativen Ströme

$$\Sigma(-I) = (-I_{\mathrm{I}}) + (-I_{\mathrm{II}}) + \cdots + (-I_{P-1}) + (-I_P) + (-I_{P+1}) + \cdots + (-I_{N-1}) + (-I_N),$$

also für $\Sigma(+I) = \Sigma(-I)$

beträgt allgemein für den einzelnen beliebigen Leiter p

$$L_p = l \cdot 10^{-4} \cdot \left\{ \frac{\mu}{2} + 2 \log \operatorname{nat} \frac{\Delta_I \cdot \Delta_{II} \cdots \Delta_N}{\varrho \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_2 \cdots \Delta_n} \right\}.$$

Im Zähler des zweiten Gliedes stehen die Funktionen Δ_I bis Δ_N, im Nenner Δ_1 bis Δ_n, die folgendermaßen gebildet werden: Es ist

$$\Delta_I = \delta_{p,I}^{I_I/I_p} \qquad \Delta_1 = \delta_{p,1}^{I_1/I_p},$$

worin $\delta_{p,I}$ bis $\delta_{p,N}$ die Abstände δ des betrachteten Leiters p von allen Leitern, die entgegengesetzt gerichteten Strom führen, $\delta_{p,1}$ bis $\delta_{p,n}$ die Abstände von jenen Leitern, in denen der Strom in derselben Richtung wie im betrachteten Leiter fließt. Der Exponent von δ ist gleich dem Verhältnis der Ströme jener Leiter, deren Abstand die Potenzbasis bildet. ϱ_p ist der Halbmesser des Leiters p oder eines mit ihm flächengleichen Kreises in cm, l die Leiterlänge in km, μ die Permeabilität, für Kupfer = 1, für Stahlschienen = 18 (nach Messungen).

Die Reaktanz beträgt dann

$$x_p = \omega L_p$$

und der Scheinwiderstand

$$z_p = \sqrt{R_p^2 + x_p^2}.$$

(804) Besondere Fälle. 1. Fahrdraht über Einfachgleis mit Schienenrückleitung (Abb. 464). Fahrdrahtquerschnitt $\varrho_1^2 \pi = 50\ \mathrm{mm}^2$; $\varrho_1 = 0{,}8$ cm. Schienenquerschnitt 5160 mm²; $\varrho_I = \varrho_{II} = 8{,}1$ cm. Leiter mit positiven Strömen: Leiter 1 = Fahrdraht; $I_1 = +I$. Leiter mit negativen Strömen: Schiene S_I, $I_{\mathrm{I}} = -\frac{1}{2}I$; Schiene S_{II}, $I_{\mathrm{II}} = -\frac{1}{2}I$. Abstände $\delta_{1,\mathrm{I}} = \delta_{2,\mathrm{II}} \approx H = 600$ cm; $\delta_{\mathrm{I,II}} = g = 143{,}4$ cm.

a) Fahrdraht: Induktanz $L_1 = \left\{\frac{1}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^{1/2}}{\varrho_1}\right\} 10^{-4} = 0,00255\, H.$
Für 25 Per/s: $k_1 = 2\pi\nu L_1 = 0,4 \cdot \Omega/\text{km}$; der Ohmsche Widerstand:

$R_1 = \frac{1000}{57 \cdot 50} = 0,35\,\Omega/\text{km}$ und der Scheinwiderstand: $z_1 = \sqrt{0,35^2 + 0,4^2} = 0,53\,\Omega/\text{km}.$

b) Gleis: Induktanz einer Schiene: $L_{\text{I}} = L_{\text{II}} = \left\{\frac{18}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^2}{\varrho_{\text{I}} \cdot g}\right\} 10^{-4}$
$= 0,00266$ H. oder für die beiden parallelgeschalteten Schienen: $^1/_2 L_I = 0,0013$ H.
Die Reaktanz ist daher: $^1/_2 x_{\text{I}} = {}^1/_2 x_{\text{II}} = 2\pi\nu L_{\text{I}} = 0,21\,\Omega/\text{km}$. Der Gleichstromwiderstand der Schienen von 40 kg/m ist $^1/_{40} = 0,025\,\Omega/\text{km}$ einer Schiene, der effektive Widerstand daher für $R_w = 7\,R_g = 0,175\,\Omega/\text{km}$ und für die parallelgeschalteten Schienen: $0,0875\,\Omega/\text{km}$. Der Scheinwiderstand der Schienen

$$^1/_2 z_I = \sqrt{0,21^2 + 0,0875^2} = 0,227\,\Omega/\text{km Gleis.}$$

Der Scheinwiderstand der ganzn Schleife aus Fahrdraht und Schienenrückleitung sonach

$$\sqrt{\{(0,35 + 0,0875)^2 + (0,4 + 0,21)^2\}} = 0,75\,\Omega/\text{km}.$$

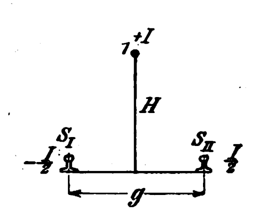


Abb. 464.
Fahrdraht über Einfachgleis.

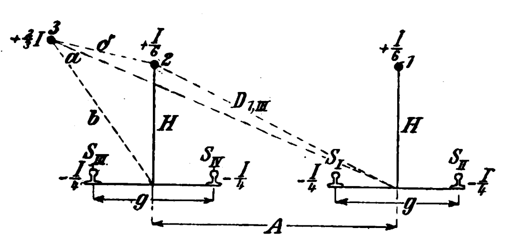


Abb. 465. Doppelgleis mit Speiseleitung ($n = 6$).

2. Doppelgleis mit Speiseleitung (Abb. 465). Zugeführte positive Ströme: Fahrdraht 1 und 2 je $+\frac{I}{n}$; Speisedraht 3 führt $\frac{n-2}{n} \cdot I$. Rückströme: 4 Schienen S_I—S_{IV} je $\frac{I}{4}$. Abstände:

$$\delta_{1,\text{I}} = \delta_{1,\text{II}} = \delta_{2,\text{III}} = \delta_{2,\text{IV}} = H;$$
$$\delta_{1,\text{III}} = \delta_{1,\text{IV}} = \delta_{2,\text{I}} = \delta_{2,\text{II}} = D.$$
$$\delta_{1,3} = \Delta; \quad \delta_{2,3} = \delta;$$
$$\delta_{3,\text{I}} = \delta_{3,\text{II}} = a; \quad \delta_{3,\text{III}} = \delta_{3,\text{IV}} = b;$$
$$\delta_{\text{I,II}} = \delta_{\text{III,IV}} = g; \quad \delta_{1,2} = \delta_{\text{I,III}} = \delta_{\text{II,IV}} = A.$$

Induktanzen:

Speiseleitung: $$L_3 = \left\{\frac{1}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{a^{\frac{n}{2(n-2)}} \cdot b^{\frac{n}{2(n-2)}}}{\varrho_3 \cdot \Delta^{\frac{1}{n-2}} \cdot \delta^{\frac{1}{n-2}}}\right\} 10^{-4} \text{ Henry.}$$

Fahrdraht: $$L_1 = L_2 = \left\{\frac{1}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^{\frac{n}{2}} \cdot D^{\frac{n}{2}}}{\varrho_1 \cdot A \cdot \Delta^{n-2}}\right\} 10^{-4} \text{ Henry.}$$

Schiene: $L_I = L_{II} = \left\{ \frac{18}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^{\frac{4}{n}} \cdot D^{\frac{4}{n}} \cdot a^{\frac{4(n-2)}{n}}}{\varrho_I \cdot g \cdot A^2} \right\} 10^{-4}$ Henry.

Gesamtinduktanz der Strecke: $x = 2\pi\nu \left\{ \frac{L_1 L_3}{2 L_3 + L_1} + \frac{L_I}{4} \right\} 10^{-4}$ Henry.

Gesamtwiderstand: $R = \frac{R_3 R_1}{2 R_3 + R_1} + \frac{R_I}{4}$ Ohm.

Der gesamte scheinbare Widerstand: $z = \sqrt{x^2 + R^2}$ Ohm.

(805) Der **Isolationswiderstand** beträgt nach Lichtenstein (ETZ 1907, S. 648) für Straßenbahnschienen etwa 0,2 Ω/km gegen Erde und für Vollbahnschienen auf Schotter und Holzschwellen etwa 0,84 Ω/km gegen Erde. Der Isolationswiderstand für die Schwelle etwa 1200 Ω.

3. Kraftwerke.

(806) Bahnkraftwerke im allgemeinen. Für die Errichtung von Bahnkraftwerken gelten im allgemeinen die für die elektrischen Kraftwerke überhaupt maßgebenden Gesichtspunkte. Die Lage des Kraftwerkes soll möglichst nahe den Verbrauchsmittelpunkten des elektrischen Stromes angelegt werden. Aber praktische und wirtschaftliche Rücksichten ergeben oft eine von der theoretisch richtigen weit abweichende Lage.

Auf unbedingte Betriebssicherheit der Anlage ist selbst auf Kosten der Wirtschaftlichkeit Rücksicht zu nehmen. Daher sollen in großen Kraftwerken die Kessel nicht nur in eigenen, von den übrigen Gebäuden vollständig getrennten Kesselhäusern untergebracht, sondern auch in mehreren voneinander vollständig getrennten Gruppen aufgestellt werden. Jede Kesselgruppe soll ihr eigenes Generatoraggregat, ihre eigene Dampfrohrleitung besitzen und eine unabhängige Stromerzeugungsanlage für sich bilden. Diese weitgehende Unabhängigkeit der Einheitsgruppen voneinander reicht jedoch nur bis zu den Sammelschienen. Im Interesse höchster Betriebssicherheit aber haben z. B. die N. Y. Central und die Brooklyn Rapid Transit Co. zwei voneinander unabhängige Kraftwerke errichtet.

Die Spulen der Transformatoren sind gegen mechanische Beanspruchungen aufs sorgfältigste zu sichern, weil die bei etwaigen Kurzschlüssen auf der Strecke zu liefernden Augenblicksleistungen leicht zerstörend wirken können.

Die Bahngeneratoren müssen sorgfältiger isoliert werden als Maschinen für ortsfesten Betrieb, die Wickelköpfe müssen gegen das Gehäuse versteift werden. Die Läufer der Generatoren sollen mit Dämpferwicklungen versehen sein. Wegen der starken Stromstöße empfiehlt sich eine selbsttätige Spannungsregelung (Tirrill, Rice-Danielsonsche Compoundierung; Einphasengeneratoren Altona, v. Glinski, Z. d. V. D. I. 1908, S. 1590). Richtlinien für Wechselstromkraftwerke (Muldenstein-Altona), EKB 1912, S. 670. Das Einphasenkraftwerk Altona (Blankenese-Ohlsdorf) ETZ 1909 und 1911, S. 1152. Allgemeine Angaben und Zusammenstellung amerikanischer elektrischer Bahnkraftwerke EKB 1909, S. 691.

(807) Unterwerke. Die Zahl und die Lage der Unterwerke ist durch den zulässigen Spannungsabfall in den Schienen und in der Oberleitung bestimmt. Insbesondere ist die Anlage der Unterwerke an Bahnknotenpunkten als dem natürlichsten Verteilungspunkt der Energie zu empfehlen. Bei Bestimmung der Größe der Unterwerke hat man ähnlich wie bei Kraftwerken vorzugehen und an Hand des Fahrplanes und der Zuggewichte die Zahl, den Stromverbrauch und die Entfernung der Züge von den Unterwerken festzustellen und den gesamten, den höchsten und den mittleren Verbrauch zu berechnen. Der Spannungsabfall ist für die ungünstigste Lage der Züge und für den stärksten Betrieb anzu-

nehmen. Dabei ist mit einem mit der Zeit allmählich wachsenden Betriebe zu rechnen. Aus dem Belastungsfaktor ergibt sich ein Anhaltspunkt für die Größe und Zahl der zu wählenden Einheiten. Sie werden passenderweise so angenommen, daß sowohl bei leichtem als auch bei schwerem Betrieb die Einheiten möglichst vollbelastet laufen. Dabei ist es vorteilhaft, für alle Unterwerke die gleichen Einheiten zu wählen. Der Wirkungsgrad der Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerke kann von den Drehstromsammelschienen des Unterwerks bis zum Stromabnehmer zu etwa 73—77% angenommen werden. Es entfallen nämlich auf die ruhenden Transformatoren Drehstrom-Hochspannung-Niederspannung etwa 3%, auf die umlaufenden Umformer etwa 10—12% und auf die Verluste im Fahrdraht 10—12%. Hierzu kommen noch etwa 4% für Speiseleitung-Sammelschienen-Unterwerk bis Sammelschienen-Kraftwerk und etwa 3% auf die Niederspannung-Hochspannung-Transformatoren im Kraftwerk. Der Wirkungsgrad vom Generator bis zum Stromabnehmer ist daher im Mittel etwa 68%. Die Leistung des Kraftwerkes ergibt sich durch Überlagerung der Leistungen aller Unterwerke unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Unterwerke und der Übertragungsleitungen.

Die Gesamtleistung aller in Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerken aufgestellten Maschinen ergibt mit Rücksicht auf die Notwendigkeit, den höchsten Bedarf des Bezirkes decken zu müssen, im Verein mit dem schlechten Belastungsfaktor und der geringen Überlastungsfähigkeit der umlaufenden Aggregate einen die Leistung der im Kraftwerk aufgestellten Maschinen um 40—60% übersteigenden Betrag.

Die Unterwerke in Drehstrom-Gleichstromsystemen enthalten neben den umlaufenden Umformern ruhende Hochspannungstransformatoren, wenn die Übertragungsspannung höher als 13 kV ist, ferner vollständige Schaltanlagen für Hoch- und Niederspannung auf der Wechselstromseite und für Niederspannung auf der Gleichstromseite.

In reinen Wechselstromsystemen dagegen kann die Dauerleistung aller ruhenden Transformatoren in den Unterwerken zusammen selbst kleiner sein als die Dauerleistung des Kraftwerkes. Denn die Transformatoren können Belastungsstöße bis zum 6fachen aufnehmen und aussetzend selbst mit der doppelten und dreifachen Last beansprucht werden.

Die umlaufenden Umformer sind entweder Motorgeneratoren, Kaskaden- oder Einankerumformer. Motorgeneratoren gestatten eine weitgehende Spannungsregelung und daher größeren Spannungsabfall auf der Wechselstromseite als Einankerumformer, besitzen aber schlechteren Wirkungsgrad und sind teurer als Einankerumformer. Diese aber müssen wieder für Niederspannung ausgeführt werden, erfordern also in allen Fällen noch ruhende Transformatoren und verlangen besser geschulte Wartung. Durch Verwendung von Zusatzmaschinen oder Potentialreglern kann die Spannung der Einankerumformer in genügenden Grenzen geregelt werden. Wirkungsgrad und Anschaffungskosten des Kaskadenumformers liegen ungefähr in der Mitte zwischen Einankerumformer und Motorgenerator. (554 u. folg.)

Drehstrom-Gleichstromumformwerke für Bahnkraftwerke EKB 1912, S. 302.
Amerikanische Umformerpraxis und Unterwerke EKB 1909, S. 208.

(808) Pufferanlagen. In vielen Fällen hat sich die Verwendung einer Akkumulatorbatterie in den Kraft- oder Unterwerken als vorteilhaft erwiesen, insbesondere wenn sie so reichlich gewählt wird, daß sie nicht nur zum Ausgleich der Belastungsschwankungen, sondern auch als Ersatz für mindestens eine Maschineneinheit dient und im Bedarfsfalle kurzzeitig zur Stromlieferung ans Netz unmittelbar herangezogen werden kann; vgl. (777).

Die N. Y. Central hat in ihren Unterwerken Batterien in großem Umfange verwendet. Die größte davon umfaßt 318 Zellen mit einer Entladestromstärke von etwa 4000 A eine Stunde lang und 12000 A eine Minute lang (Dawson, S. 744).

In Verbindung mit selbsttätig umkehrbaren Batteriezusatzmaschinen (reversible booster) sind Pufferbatterien namentlich in kleineren Werken mit niedrigem Belastungsfaktor zu empfehlen. Sie übernehmen dort selbsttätig die Lieferung der Spitzenleistung zu Zeiten des höchsten Strombedarfes und gestatten, kleinere, nur für die mittlere Leistung bemessene Einheiten zu verwenden, während sie andererseits zu Zeiten schwachen Strombedarfs von den Generatoren geladen werden, so daß diese auch dann noch vollbelastet laufen können. Die Zusatzmaschine erhält im allgemeinen gemischte Wicklung und liegt in Reihe mit der Batterie, parallel zum Generator. Die Abb. 466 zeigt die Piranische Anordnung. Bei hohen Belastungen überwiegt die Hauptstromerregung über die Nebenschlußerregung. Die Zusatzspannung erhöht dann die Spannung der Batterie, die sich aufs Netz entlädt, und umgekehrt. Mit diesen Anordnungen können die Belastungsschwankungen innerhalb der Grenzen von 10 bis 20% gehalten werden.

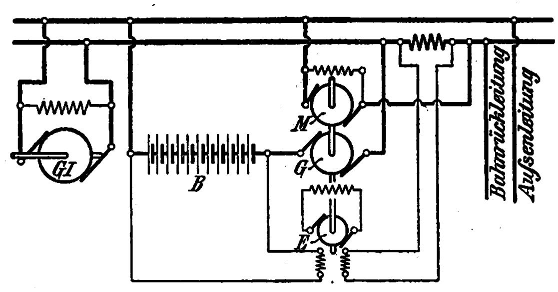


Abb. 466. Piranische Anordnung.

In der Wechselstrompufferanlage der einphasigen Albtalbahn (EKB 1915, S. 181) wurde zur Pufferung der Lastspitze eine Akkumulatorenbatterie von 285 Elementen und 1000 Ah gewählt. Sie liegt am Netz über einen Umformersatz, der sich zusammensetzt aus einem mit 750 U/min betriebenen Einphasengenerator für 8800 V 25 Per/s und einer Gleichstromdynamo von 500 kW für 590/780 V. Die Batterie wird bei Lastschwankungen zum Ansprechen gebracht durch eine Hilfserregung der Gleichstrommaschine, die von einem Reihentransformator des Netzes über einen Danielsonschen Umformer gespeist wird.

Literatur: Über diese und ähnliche Schaltungen vgl. Schröder, ETZ 1915, S. 6. — Über Pirani- und Lancashire-Gruppen, EKB 1912, S. 170; 1915, S. 169. — Graphische Ermittlung der Leistung von Pufferbatterien, ETZ 1900, S. 78. — Über Schwungrad-Pufferanlagen mit Scherbius-Regelsatz (Mont-Cenis) EKB 1910, S. 101, 131, 151; 1914, S. 534. — Über andere Puffer-Anordnungen vgl. den in Amerika häufigen Entz-Regulator, Electrician v. 25. 6. 1909 und Woodbridge, Verwendung von Pufferbatterien für die Regelung von Wechselstromnetzen in Verbindung mit Spaltpolumformern, Proceed. A. I. E. E. Juni 1908 und Juli 1909 und ETZ 1909, S. 104.

IV. Mechanik der Zugförderung.

(809) Die **Leistung des Kraftwerkes** ist durch Überlagerung des Energieverbrauches der gleichzeitig in Betrieb befindlichen Züge gegeben. Dabei ist der Verbrauch für die reine Zugförderung zu vermehren um den Verbrauch für Nebenleistungen wie Licht, Heizung, Pumpe, Steuerstrom usw. (812).

Die für reine Zugförderung benötigte Leistung muß an Hand des Streckenprofils, der Zuggewichte und des Fahrplanes berechnet werden. Für Straßenbahnen kann im allgemeinen der in (810) angedeutete Rechnungsgang verwendet werden. Für Vollbahnbetrieb muß die Rechnung aber um so genauer durchgeführt werden, je schwerer der Betrieb ist, d. h. je größer die Zuggewichte sind und je geringer

die Zugdichte ist. Weil im Vollbahnbetrieb der Verkehr genau geregelt ist, ist eine genaue Berechnung der Bewegungsverhältnisse der Züge, und zwar mit Hilfe eigens aufgestellter Fahrdiagramme, auch in allen Fällen möglich.

Der auf diese Weise ermittelte Gesamtverbrauch ergibt die Leistung am Stromabnehmer und ist noch durch den Wirkungsgrad der Übertragung, der Linie und der Unterwerke zu teilen.

(810) Zugkraft und Zugwiderstand. Die für die Beförderung eines Zuges notwendige Zugkraft beträgt für ein Zuggewicht von G t: für die Beschleunigungszeit mit einer mittleren Beschleunigung von b m/s²

$$G\,(w+s+100\,b)\ \mathrm{kg}^*$$

und für die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

$$G\,(w+s)\ \mathrm{kg}^*$$

Hierin bedeutet w den gesamten Zugwiderstand für 1 t und s die Steigung in ‰.

Die größte Anzugskraft ist entweder durch die größte Beschleunigung in der Ebene gegeben oder durch die größte Steigung, auf welcher der Zug noch mit der geringsten Beschleunigung anfahren können muß.

Wahl der Beschleunigung und Bremsverzögerung (783).

Der Zugwiderstand setzt sich im allgemeinen aus dem Reibungswiderstand und dem Luftwiderstand sowie dem Krümmungswiderstand der Kurven zusammen. Für Straßenbahnen kann der Reibungswiderstand im Mittel zu 6 kg*/t angenommen werden, wechselt jedoch so stark mit dem Zustand des Gleises, daß von einer genauen Berechnung des kleineren zusätzlichen und wegen der wechselnden Geschwindigkeit der Straßenbahnen schwer zu bestimmenden Luftwiderstandes Abstand genommen werden kann. Man setzt am besten Reibung und Luftwiderstand zusammen = rd. 8 kg*/t.

Steigungen bis 6‰ können im Straßenbahnbetrieb vernachlässigt werden, weil die bei der Bergfahrt mehr aufgewendete Energie bei der Talfahrt wiedergewonnen wird.

Für Vollbahnen kann der Zugwiderstand für überschlägige Rechnungen nach der reichlichen Formel

$$w = 2{,}5 + 0{,}0005\, v^2$$

eingesetzt werden. Darin bedeutet das zweite Glied den mit der Geschwindigkeit v [in km/h] quadratisch wachsenden Luftwiderstand.

Für genaue Berechnungen und für die Aufstellung der Fahrdiagramme ist die auf Grund der Schnellbahnversuche erhaltene Formel zu verwenden:

$$W = 2{,}5\,G + \{0{,}00015\,G + 0{,}00813\,(n-1) + 0{,}0065\,F\}\,v^2.$$

Darin ist W der Zugwiderstand für G t Zuggewicht, $(n-1)$ die Zahl der angehängten Wagen oder n die volle Wagenzahl, F die Stirnfläche des ersten Wagens in m², v die Geschwindigkeit in km/h.

In Kurven ist zum Zugwiderstand noch der Krümmungswiderstand hinzuzuzählen. Er beträgt für Vollspur $650/(r-55)$ kg*/t, wenn der Krümmungshalbmesser $r > 300$ und $500/(r-30)$ wenn $r < 300 \cdot r$ in m.

Der Bahnwiderstand in Tunnels kann gegen die Ventilationsrichtung bedeutend höher sein (Simplon 11,2 kg*/t bei 70 km/h).

Der Bewegungswiderstand elektr. Lokomotiven mit Parallelkurbelantrieb beträgt zu Beginn des Anfahrens nach v. Glinski (Z. d. V.D.I. v. 21. 12. 1912) im Mittel 30 kg*/t für eingelaufene und 40 kg*/t für nicht eingelaufene Fahrzeuge.

Die mittlere Leistung der Motoren kann in überschlägiger Weise aus der mittleren Zugkraft Z_m in kg und der mittleren Fahrgeschwindigkeit in km/h berechnet werden:

$$N_m = \frac{Z_m \cdot v_m}{370}\ \text{Kilowatt.}$$

Für Anfahrten ist noch ein Zuschlag zu machen, der von der Zahl der Haltestellen und der mittleren Stationsentfernung abhängig ist und im Mittel etwa 25 % beträgt. Die der Leistung nach bemessenen Motoren sind noch auf ihre höchste Zugkraft nachzuprüfen.

(811) Beschleunigung der umlaufenden Massen. Für die Masse des Zuges ist nicht der wahre Betrag, sondern ein für überschlägige Rechnungen um etwa 7 bis 12 % erhöhter Betrag einzusetzen, um die Beschleunigung der umlaufenden Massen zu berücksichtigen.

Man drückt am besten den Schwungradeffekt $^1/_2 m \omega^2 \varrho^2$, wenn m die Masse des umlaufenden Körpers, ω die Winkelgeschwindigkeit und ϱ den Trägheitshalbmesser bezeichnet, als einen Teil der lebendigen Kraft des Wagens aus, indem man sich dessen Masse M um $\varDelta M$ erhöht denkt und die Winkelgeschwindigkeit ω durch die Geschwindigkeit des Wagens und das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ des Vorgeleges ausdrückt. Dann ist:

$$v = \omega r \text{ bzw. } \omega_1 \frac{r}{\ddot{u}}, \quad r \text{ ist der Laufradhalbmesser}$$

und

$$\frac{m}{2} \omega^2 \varrho^2 = \frac{m}{2} v^2 \left(\frac{\varrho}{r}\right)^2 \text{ bzw. } \frac{m}{2} v^2 \left(\frac{\varrho \cdot \ddot{u}}{r}\right)^2.$$

Die gesamte lebendige Kraft des Wagens ist also

$$M \frac{v^2}{2} + \frac{m v^2}{2} \left(\frac{\varrho}{r}\right)^2 \quad \text{oder} \quad M \frac{v^2}{2} \left\{1 + \frac{m}{M} \cdot \left(\frac{\varrho}{r}\right)^2\right\}$$

oder der Betrag

$$\varDelta M = \frac{m}{M} \left(\frac{\varrho}{r}\right)^2 \text{ bzw. } \frac{m}{M} \left(\frac{\varrho \cdot \ddot{u}}{r}\right)^2.$$

(812) Arbeitsbedarf für Nebenleistungen. Zugheizung. Der Arbeitsverbrauch beträgt rd. 0,2 bis 0,3 kW für 1° C Temperaturunterschied für Aufrechterhaltung der Innentemperatur eines Drehgestellwagens.

Die erste Erwärmung erfordert etwa

$$\left(0{,}3 + \frac{40}{t}\right) \vartheta \text{ Kilowatt.}$$

t = Erwärmungszeit in Minuten, ϑ = die zu erreichende Temperaturerhöhung in °C.

Man kann auch mit etwa 200 W/m³ für höchstens −15° C Außentemperatur rechnen. Für den Führerstand einer Lokomotive rechnet man am besten etwa 2 kW, für einen normalen Straßenbahnwagen etwa 3 kW. Hruschka rechnet für österreichische Verhältnisse 110 W/m³ am Stromabnehmer (EKB 1910, S. 599).

Zugbeleuchtung. Für jedes t km personenbefördernder Züge können nach Hruschka etwa 0,34 Wh an den Stromabnehmern gesetzt werden.

Steuerung. Für mittlere Verhältnisse sind für die Zugeinheit etwa 2 kW dauernd erforderlich. Für Strecken mit Steigungen unter 20‰ und für mittlere Geschwindigkeiten (50 km/h) können etwa 0,2 Wh/t km gesetzt werden.

Bremsung. Für Schnellzüge etwa 0,2 Wh/t km Luftpumpenverbrauch.
Für Personenzüge etwa 0,4 „
Für Güterzüge etwa 0,32 „ (vgl. 813).

(813) Stromverbrauch, Fahrdiagramme. Der Stromverbrauch für Zugförderung ist gleich dem Verbrauch für die Fahrt auf den einzelnen Strecken mit konstanter Geschwindigkeit, vermehrt um die Bremsarbeit. Dagegen ist die für die Beschleunigung notwendige Energie nicht mit zu berechnen, weil ein Teil davon beim Auslaufen nützlich wiedergewonnen wird, während der Rest eben in Bremsarbeit vernichtet wird.



$$\text{Verbrauch für 1 t km} = \frac{\text{mittlere Zugkraft für die Tonne} \times 9{,}81}{3600 \times \eta}\ \text{kWh},$$ η ist der Wirkungsgrad der Anlage.

Die **Bremsarbeit** ist gleich der gesamten lebendigen Kraft $\frac{1}{2} m v^2$ des Zuges beim Bremsbeginn. Bei Straßenbahnen liegt die Zahl der Haltestellen zwischen 2 und 5 auf 1 km. Der Bremsbeginn erfolgt bei Straßenbahnen bei annähernd 75% der höchsten Geschwindigkeit. Für Schnellzüge kann man eine Bremsung auf 25 km, für Personenzüge auf 5 bis 10 km bei $^2/_3$ Geschwindigkeit, für Güterzüge eine Bremsung auf 4 km bei halber Geschwindigkeit setzen.

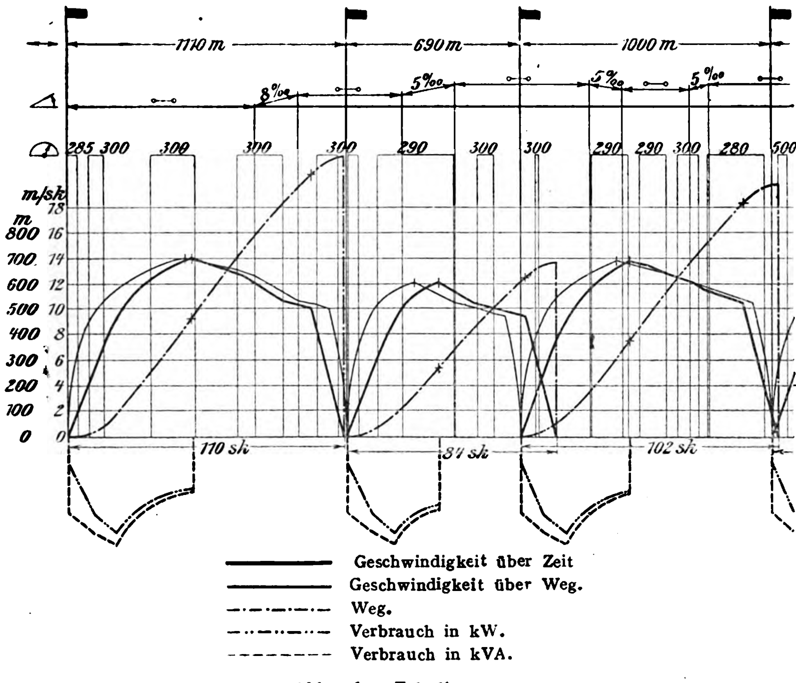


Abb. 467. Fahrdiagramm.

Der Verbrauch für vollbahnartige Betriebe wird an Hand der **Fahrdiagramme** berechnet. Dazu müssen die Kennlinien der verwendeten Motoren, insbesondere aber die Geschwindigkeits-Zugkraftkurve bekannt sein oder angenommen werden. Mit ihrer Hilfe können die Zeit-Geschwindigkeit, die Zeit-Weg- und die Weg-Geschwindigkeitskurve, ferner die Zeitleistungskurven für jeden Zug und für jede Strecke aufgestellt werden.

Für Voruntersuchungen genügt jedoch die Aufstellung eines sogenannten **mittleren Fahrdiagrammes**. Man erhält dieses durch die Annahme eines mittleren Stationsabstandes mit mittleren Steigungsverhältnissen und einer dem Fahrplan entsprechenden mittleren Geschwindigkeit.

Im Fahrdiagramm unterscheidet man im allgemeinen die Beschleunigungszeit und die Bremszeit (vgl. die Fahrdiagramme, Abb. 467).

Bei der Aufstellung der Fahrdiagramme geht man unter Annahme einer feststehenden Art des Anfahrens von der Geschwindigkeits-Zugkraftkurve des Motors

aus und trägt für die jeweiligen Geschwindigkeiten die Fahrtwiderstände ein. Dann ergibt der Unterschied zwischen Zugkraft und Fahrtwiderstand bereits den für die Beschleunigung zur Verfügung stehenden Zugkraftüberschuß. Für die Auslaufzeit ergeben sich in ähnlicher Weise Zeit und Weg aus der durch den Fahrtwiderstand bewirkten Verzögerung, während die Bremsverzögerung angenommen werden muß, um Bremszeit und Bremsweg zu berechnen.

Mit Hilfe dieser Gleichungen, welche auch in Form von Kurven dargestellt werden können, kann für jede Geschwindigkeit Zeit und Weg des Wagens berechnet und die Zeit-Wegkurve erhalten werden. Aus den übrigen Kennlinien des Motors können Stromstärke und Spannung, cos φ und Wirkungsgrad entnommen und alle gewünschten Kurven erhalten werden. Durch Planimetrieren der kVA-, kW- und kW-Zeitkurve ergibt sich der gesamte Verbrauch für die Zugförderung während der ganzen Fahrt, während für den Energieverbrauch für Licht, Pumpe, Heizung usw. Zuschläge zu machen sind. Zur bequemen und schnellen Aufstellung der Fahrdiagramme sind eine Reihe graphischer Methoden ausgearbeitet worden (vgl. Hruschka, Ermittlung sämtlicher Zugförderungsgrößen im Bahnbetrieb, EKB v. 14. 1. 1910. Pforr, Zugbewegungen, Oldenbourg, München 1919).

Für die genaue Berechnung des Stromverbrauches genügt jedoch nicht die Aufstellung eines mittleren Fahrdiagrammes. Es sind vielmehr die Fahrdiagramme für die ganze Strecke, und zwar für die Hin- und Rückfahrt getrennt zu berechnen.

(814) Nachrechnung der Motoren wegen der Erwärmung. Im Anschluß an die für einen mittleren Stationsabstand oder für die ganze Strecke aufgestellten Fahrdiagramme ist zu untersuchen, ob der Motor für den gedachten Betrieb ausreicht, und die Erwärmung in zulässigen Grenzen bleibt. Zu diesem Zweck genügt es bei Gleichstrom über der Zeit als Abszisse die zugehörigen I^2-Werte aufzutragen. Dann ergibt sich aus der planimetrierten Fläche der $I^2 dt$-Kurve und aus der ganzen Fahrzeit T der quadratische Mittelwert der Strombelastung $\sqrt{\Sigma(I^2 dt)/T}$, der unterhalb des im Prüffeld festgestellten dauernd zulässigen Wertes liegen muß. Dabei ist darauf zu achten, daß der Dauerlauf des Motors im Prüffeld mit der Dauerstromstärke auch mit jener Spannung und Geschwindigkeit vorgenommen werde, die den mittleren Eisenverlusten im Betriebe entsprechen.

Für Wechselstrom empfiehlt es sich, die Verluste für die ganze Strecke unmittelbar aufzustellen. Dazu kann die Kurve der aufgenommenen Energie im Fahrdiagramm benutzt werden, wenn der Unterschied zwischen ihr und der Kurve der abgegebenen Energie planimetriert und durch die ganze Fahrzeit dividiert wird. Dieser Wert entspricht bereits den vom Motor dauernd abzuführenden Verlusten.

Die Erwärmungsrechnung kann sich auch noch auf die einzelnen Teile wie Kollektor, Eisen und Kupfer erstrecken. Zu diesem Zwecke sind die Verluste an Hand der Motorkennlinien zu trennen. Für gut gelüftete Motoren, bei denen sich ein Temperaturausgleich in allen Teilen rasch vollzieht, ist eine so weitgehende Nachrechnung überflüssig.

V. Rentabilität.[1])

(815) Rentabilitätsberechnung. Man kann für den ersten Entwurf überschlägig von einem festen Preis der gelieferten kWh ausgehen und hierzu in Anlehnung an ausgeführte ähnliche Anlagen die Unterhaltungskosten einschließlich Tilgung und Verzinsung für die ganze Streckenausrüstung und für das Rollmaterial hinzuzählen (vgl. hierzu [612] u. [649] u. folg.).

Das Kraftwerk der New Yorker Untergrundbahnen erforderte etwa 314 M für 1 installiertes kW[2]), das Kraftwerk Altona insgesamt 3,6 Millionen oder 500 M für 1 kW.

1) Preisgrundlage vom Juli 1914.
2) EKB 1907, S. 449.



Der Kohlenverbrauch für 1 abgegebenes kW kann für Dampfturbinen von etwa 1000 kW zu etwa 1,4 kg angenommen werden.

Man kann folgende Werte für 1 kWh an den Sammelschienen für großе Dampfturbinenwerke[1]) annehmen:

Verzinsung und Erneuerung 10% = . . .	2	Pfennig
Kohlenkosten	1	„
Unterhaltung und Bedienung	0,5	„
Gesamte Erzeugungskosten	3,5	Pfennig

für einen Belastungsfaktor von 20%.

Die Gesamtbaukosten von Wasserkraftwerken (vgl. Thielsch, Zeitschr. f. d. ges. Turbinenwesen 1908, S. 357) hängen im wesentlichen von dem Verhältnis der verfügbaren Wassermenge zur Gefällshöhe ab. In Niederdruckanlagen verschlingt die für die Kanalanlage notwendige Bodenerwerbung und die Errichtung langer Werkkanäle oft hohe Summen. Bei Talsperranlagen können die Grunderwerbungskosten bis 25% der gesamten Baukosten betragen. Für mittlere Verhältnisse schwanken die Kosten der hydraulischen Anlage zwischen 130 M/kW für große Gefälle und 650 M/kW für kleine Gefälle. Die Gesamtkosten einschl. des elektrischen Teils betragen für mittlere hydraulische Verhältnisse

etwa 220 M/kW für Anlagen in der Größe von etwa 20000 kW
„ 270 M/kW „ „ „ „ „ „ „ 4000 „
„ 1300 M/kW „ „ „ „ „ „ „ 400 „

Die Kosten der hydraulischen Anlage allein betragen z. B. für Schaffhausen (etwa 1800 kW) etwa 860 M/kW, der Usine de Chèvres Genf (13 000 kW) etwa 350 M/kW und 480 M/kW einschl. elektrischer Anlage, der Niagarafälle (40000 kW) etwa 2100 M/kW einschl. elektrischer Anlage und Fernleitung, der Trollhättafälle 460 M/kW usw.

Lübeck (Zeitschr. f. d. ges. Turbinenwesen 1908, S. 538) setzt für Verzinsung, Tilgung, Erhaltung und Betrieb 12% der Anlagekosten. Das ergäbe für große Anlagen mit im Mittel 475 M/kW und für einen Belastungsfaktor von 0,2 etwa 3,25 Pf/kWh.

(816) Kosten für reine Zugförderung. Der Preis von 1 kWh am Stromabnehmer ergibt sich aus den Kosten der kWh an den Sammelschienen nach Teilung durch den Wirkungsgrad der Übertragungsleitung einschl. der Unterwerke und des Fahrdrahtes.

Unter Zugrundelegung der Strompreise am Stromabnehmer ergeben sich dann aus dem für die Zugförderung ermittelten gesamten Stromverbrauch die Zugförderungskosten in kWh/km oder in kWh/tkm.

Erfordert z. B. ein Zug von 250 t Gesamtgewicht zur Beförderung in der Ebene mit 120 km/h 800 kW, also

$$\frac{800}{120} = 6{,}7 \text{ kWh/Zugkilometer} \quad \text{oder} \quad \frac{6700}{250} = 27 \text{ Wh/tkm},$$

so ergeben sich die reinen Zugförderungskosten für Wechselstrombahnen unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrades der Wagenausrüstung von etwa 84 bis 88% und bei einem Preis von 5,75 Pf/kWh am Stromabnehmer zu

$$\frac{6{,}7 \times 5{,}75}{0{,}86} = \text{etwa } 45 \text{ Pf für 1 Zugkilometer und } 0{,}18 \text{ Pfg/tkm}.$$

Der Durchschnitt von etwa 30 amerikanischen Bahnen ergab für die reine Zugförderung rd. 60% der gesamten Betriebskosten, für die Unterhaltung aller Teile 20%, Generalunkosten 20%.

Die Gesamtbetriebskosten eines 58 t-Einphasenmotorwagens mit einem

[1]) Nach Pforr. Glasers Annalen 1907.

Energieverbrauch von 36 Wh/t km würden demnach bei einem Strompreis von 6 Pf am Stromabnehmer betragen:

Reine Zugförderungskosten . . . . . . $36 \times 6 \times 58 : 1000 = 12{,}5$
Unterhaltungskosten und Verkehrskosten . . . . $= 8{,}5$

Gesamtbetriebskosten 21 Pf/Wagenkm

Vom Bahnkraftwerk Altona wurden 2,17 Millionen kWh im Monat zu 4,68 Pf/kWh Erzeugungskosten abgegeben und 0,53 Millionen Wagenkm und 37 Millionen tkm gefahren. Der Dampfverbrauch schwankte zwischen 8,9 und 14 kg/kWh, Mittel 10 kg/kWh. — Kohlenverbrauch im Mittel 1,7 kg/kWh (Heizwert 6400 cal). cos φ 0,8 bis 0,9, min 0,63 (ETZ 1911, Heft 47 und 49).

Vom Bahnkraftwerk der N. Y. N. H. H. R. wurden im Juni 1914 im Mittel täglich 300000 kWh zu 3 Pf/kWh Erzeugungskosten abgegeben und 80 Millionen tkm im Monat gefahren. Kohlenverbrauch 1,26 kg/kWh.

Über die Zugförderungskosten für Gleichstrom, Einphasenstrom und Drehstrom vgl. die Literaturangaben (781).

(817) Preise für Oberleitungsmaterial. Die nachstehenden Angaben sollen nur Anhaltspunkte für die Anlagekosten der Streckenausrüstung geben.

A. Straßenbahnoberleitung.

1. 500 bis 750 V. 1 km Oberleitung mit Fahrdraht 53 mm², Entfernung der Maste im Durchschnitt mit rd. 30 m angenommen (Kurven eingeschlossen) einschl. Schienenverbindung mit 1 × 53 mm² für den Stoß bei 12 m Schienenlänge.

		Einfachgleis Mark für 1 km	Doppelgleis Mark für 1 km
Ausleger.	Rohrmasten . . .	7 800	11 400
	Gittermasten . .	6 000	9 200
	Holzmasten . . .	4 500	7 400
Queraufhängung.	Rohrmasten . . .	11 000	15 300
	Gittermasten . .	7 800	10 800
	Holzmasten . . .	5 000	7 600
	Rosetten	4 300	6 600

2. 1000 V. Die unter A 1 angegebenen Preise erhöhen sich um 120 M/km bei Einfachgleis, um 240 M/km bei Doppelgleis.

3. 1500 V. Gleichstrom, Einfachgleis, Kettenaufhängung, 50 m Mastenentfernung, sonstige Annahmen wie vor 5700 M.

B. Kettenaufhängung für Wechselstrombahnen.

1. 1 km Oberleitung für Hochspannung 6000 V, einfache Isolation an Gittermasten und Auslegern, 50 m Mastenentfernung, 1 × 53 mm² Fahrdraht, einschl. Schienenverbindung 1 × 53 mm² Schienenlänge 12 m; für 1 km mit Montage 6300 M bis 6700 M.

2. Kettenaufhängung wie vor, jedoch mit selbsttätiger Nachspannvorrichtung 7300 M bis 7700 M für 1 km.

Triebwagen.

(818) Anwendungsgebiet der Triebwagen. Der Triebwagenbetrieb bietet wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Betrieb mittels Dampflokomotiven gewöhnlicher Bauart in Fällen, in denen kleinere Zugeinheiten von 60 bis 100 Personen mit mittlerer (rd. 30 km/h) Reisegeschwindigkeit zu befördern sind. Insbesondere sind Triebwagen auf Hauptstrecken von Nutzen, um den Orten, die



zwischen den Haltepunkten der Schnellzüge liegen, eine bequemere Verbindung mit diesen zu verschaffen oder um in der Nähe großer Städte einen gewissen Vorortverkehr zu ermöglichen.

Neben den Dampftriebwagen haben bisher Akkumulatorenwagen und Triebwagen mit Verbrennungsmotoren Bedeutung erlangt.

(819) Die Akkumulatorentriebwagen der preußischen Staatsbahnen besitzen 168 bis 180 Zellen für 310 bis 350 V mittlere Entladespannung und weisen bei 50 bis 60 km/h höchster Geschwindigkeit zwischen 100 und 180 km schwankende Fahrbereiche auf. Die motorische Leistung beträgt im Mittel rd. 2,3 kW/t Wagengewicht, die mittlere Kapazität der Batterie 0,8 kWh für 1 kW Motorleistung, das Gewicht der Batterie 0,15 kg für 1 Wh Kapazität, der mittlere Arbeitsverbrauch 15 Wh/t km, ausschließlich 25 bis 30% Batterieverluste.

Der Akkumulator-Doppelwagen (EKB 1909, S. 265) faßt 100 Personen, wiegt 54 t, 2 Motoren zu 62 kW Stundenleistung, 0,75 kWh/Wagen-km. Betriebskosten 43 Pf bei 6 Pf für 1 kWh bei der Ladung.

Dreiachsige Triebwagen (EKB 1909, S. 341) 33,2 t unbesetzt, Batterie 10 t, elektrische Ausrüstung 3,5 t, mech. Teil 19,7 t, 60 Personen, 2 Hauptstrommotoren zu 38 kW Stundenleistung.

Drehgestelltriebwagen (EKB 1909, S. 348) 59 t unbesetzt, Batterie 16 t, elektrische Ausrüstung 9 t, mech. Teil 34 t, 100 Personen, 4 Nebenschlußmotoren zu 38 kW Stundenleistung.

(820) Triebwagen mit Verbrennungsmotoren sind gegenüber den Akkumulatorentriebwagen von der Ladestation unabhängig und können daher größere Strecken durchlaufen.

Im benzolelektrischen Triebwagen der preußischen Staatsbahnen (EKB 1909, S. 241) ist der Verbrennungsmotor in einem besonderen, vom Wagenkasten unabhängigen Gestell gelagert, um die vom Benzolmotor hervorgerufenen mech. Schwingungen vom Wagenkasten fern zu halten. Der Benzolmotor (6 Zylinder, 66 kW Dauerleistung, 700 U/min, 1600 kg) ist durch eine elastische Kupplung mit der Dynamo (38 kW Dauerleistung, 80 kW Stundenleistung, 0 bis 650 V), die den Strom für die Gleichstromwagen-Antriebsmotoren (2 Motoren zu 40 kW Stundenleistung, 575 V) liefert, gekuppelt. Erregung der Dynamo durch besondere Erregermaschine (25 kW, 70 V). Die Antriebsmotoren werden durch Änderung der Erregung der Dynamo geregelt. Höchste Wagengeschwindigkeit 50 km/h, Benzolvorrat 200 l für 400 km. Wagendienstgewicht 37,9 t, 89 Personen, 425 kg für den Platz oder 1070 kg auf 1 m^2 der für Reisende und Gepäck verfügbaren Grundfläche. Betriebskosten rd. 0,48 M/Wagen-km. Für Vorausberechnung können 12 g Benzol für 1 tkm in wagerechter Bahn angenommen werden.

L i t e r a t u r: Triebwagenverkehr auf d. preuß. Staatsb., EKB 1909, S. 261. — Triebwagen d. preuß. Staatsb., EKB 1913, S. 249. — Triebwagen auf amerikan. Eisenbahnen, EKB 1914, S. 21. — Benzolelektr. Triebwagen d. preuß. Staatsb., EKB 1909, S. 241; 1910, S. 265; 1912, S. 621. — AEG Benzolelektr. Triebwag. EKB 1914 S. 296. — 96 PS-Öl-Triebwagen, EKB 1917, S. 145. — Dieselelektr. Triebw. d. Sächs. Staatsb., EKB 1915. S. 301.

Lokomotiven für besondere Zwecke.

(821) Verschiebelokomotiven. Die Vorteile den Dampflokomotiven gegenüber sind die stete Betriebsbereitschaft und die geringeren Betriebskosten. Zur Anwendung gelangen Oberleitungs- und Akkumulatorenlokomotiven. Diese sind jenen nur dann überlegen, wenn ausgedehnte Gleisanlagen mit starkem Verkehr in Frage kommen. Das größere Gewicht der Akkumulatorlokomotiven ist bei häufigem Anfahren mit großen Zugkräften oft erwünscht. Das Dienstgewicht der Vollspur-Akkumulatorlokomotiven liegt in der Regel zwischen 20 und 30 t, ihre motorische Leistung zwischen 30 und 80 kW.

Verschiebelokomotive der Preuß. Werkstätten-Insp. Tempelhof, ETZ 1908, S. 627. — Akk.-Lok., ETZ 1912, S. 761.

(822) Abraumlokomotiven. Zur Beförderung des Abraumes wird der Dampfbetrieb der Feuersgefahr und hohen Betriebskosten wegen in steigendem Maße durch elektrischen Betrieb ersetzt. Die Leistung gebräuchlicher zweiachsiger Lokomotiven beträgt bei 600 mm Spur 20—50 kW und bei 900 mm Spur bis 150 kW. Neuerdings gelangen für 900 mm Spur Drehgestellokomotiven von rd. 45 t mit 4 angetriebenen Achsen und 300 kW Stundenleistung zur Verwendung (ETZ 1910, S. 1135).

(823) Grubenlokomotiven. Für den elektrischen Betrieb der Grubenbahnen ist die Verwendung von 250 V Gleichstrom und Oberleitung bisher allgemein gebräuchlich gewesen. Der Fahrdraht wird an der Decke befestigt. Die Verwendung höherer Spannungen ist bei der niedrigen Fahrdrahtaufhängung unzulässig und von den Bergbehörden verboten. In neuerer Zeit wurden Grubenbahnen auch mit 150 V Einphasenwechselstrom mit Erfolg betrieben (Zeche Wilhelmine Viktoria der Gew. Hibernia). Der Wechselstrombetrieb ist zu empfehlen, wo lange ausbaufähige Strecken in Frage kommen. Da die Zechen in der Regel große Drehstromkraftwerke besitzen, kann die Bahn an eine Phase des Netzes gehängt und die Aufstellung besonderer Umformer vermieden werden. In letzter Zeit haben auch Akkumulatorlokomotiven Verbreitung gefunden.

Die Ausrüstung der Lokomotive ist auf das Notwendigste beschränkt und besteht in der Regel aus 2 Zahnradmotoren zu 10 bis 15 kW, Schaltwalze und Widerständen, bzw. Wechselstromtransformator. Spurweite 450 bis 500 mm, Geschwindigkeit 6 bis 10 km/h, Dienstgewicht 5 bis 8 t, Betriebskosten 5,5 Pf/tkm für Oberleitungsbetrieb, 6,1 Pf/tkm für Akkumulatorbetrieb gegenüber 14,4 Pf/tkm für Pferdebetrieb, bei 8stündiger Schicht für Pferde und 2,5 Pf/kWh.

Grubenlokomotive mit Akkumulatorbatterie, EKB 1910, S. 46.

Gleislose Bahnen.

(824) Das unter dem Namen der gleislosen Bahnen bekannte Betriebssystem kann vorteilhaft nur für Straßen in Frage kommen, wo der Zustand der Straßendecke für den Betrieb eines schienenlosen Verkehrsmittels überhaupt geeignet ist, wo aber zugleich die Verkehrsdichte so gering ist, daß die Anlage einer gewöhnlichen Straßen- oder Kleinbahn wirtschaftlich nicht gerechtfertigt wäre. Der „elektrische Omnibus mit direkter Stromzuführung" durch Oberleitung wird daher besonders für die Vorortlinien großer Städte als die natürliche Fortsetzung der elektrischen Straßenbahnlinien am Platze sein; er wird aus wirtschaftlichen Gründen mit dem Betriebsstrom der Straßenbahn gespeist werden und vom Endpunkt der Straßenbahn noch einige Kilometer weiter ins Land führen, in Gegenden, in denen eine Verlängerung der Straßenbahn nicht mehr wirtschaftlich wäre.

Die bekannten Eigenschaften des Elektromotors und sein großes Anzugsmoment befähigen die elektrischen Omnibusse ohne wesentliche Beeinträchtigung der Geschwindigkeit zur Mitnahme von Anhängewagen. Diese für wechselnden Verkehr wichtige Anpassung ist mit Benzinmotoren nicht erreichbar.

Die Anlagekosten sind für einen Motorwagenbetrieb mit Oberleitung allerdings höher als bei Verwendung der unabhängigen Benzinwagen. Die elektrischen Fahrzeuge sind zwar billiger, es kommen aber die Kosten für die Oberleitung hinzu. Dieser Kapitalaufwand fällt aber nur bei sehr langen Linien ins Gewicht und auch diese können noch wirtschaftlich sein, wenn durch Güterverkehr gute Ausnützung möglich ist.

Die Oberleitung wird wie bei gewöhnlichen Straßenbahnen (aber doppelpolig), mit Profildrähten ausgeführt.

Während die meisten Systeme z. B. Schiemann als Stromabnehmer Kontaktstangen verwenden, erfolgt die Stromzufuhr im Mercedes-Stollschen System durch ein auf der Oberleitung laufendes vierrädriges Wägelchen, welches mit dem Fahrzeug durch ein biegsames, sich selbst spannendes Seil verbunden ist.

Zur Fortbewegung einer Tonne Last auf Rädern sind auf schienenlosen Wegen folgende Zugkräfte erforderlich:

auf	Asphalt		20 kg*
„	Steinpflaster	je nach dem Zustand 20 bis	35 „
„	Schotterstraße	„ „ „ „ 25 „	45 „
„	Landwegen	„ „ „ „ 50 „	100 „

Literatur: El. Kraftbetr. u. Bahnen 1907, S. 311. — Archiv f. Post u. Telegraphie 1911, S. 593. — Gleislose elektr. Bahnen in England, ETZ 1911, S. 249. — Gleislose Bahnen, Bauart Schiemann, ETZ 1911, S. 351. — Heller, Gleislose elektr. Bahnen, Z. d. V. D. I. 1910, S. 703. — Mercedes-Stoll, Automobillinien der Daimler Fabrik Wr.-Neustadt. E. u. M. 1909, S. 1155. — Wirtschaftlichkeit gleisloser Bahnen, E. u. M. 1910, S. 754. — Railless Traction, Electrician v. 8. 7. 10. — Elektr. Omnibusbetrieb in Bremen. ETZ 1911, S. 177.

Elektromobile.

(825) Die Motoren werden als Hauptstrommotoren ausgeführt und zwar entweder für Übertragung mit Zahnradvorgelege, oder für unmittelbaren Antrieb als Radnaben- bzw. Innenpolmotoren.

Die Motoren mit Zahnradvorgelege sind für leichte Fahrzeuge (Droschken) bestimmt. Die Kraft wird in der Regel mittels Zahnräder auf die Laufräder der Hinterachse übertragen, der Motor wird auf der hinteren Laufachse federnd oder starr aufgehängt. Die Motoren sollen wie Straßenbahnmotoren vollkommen gekapselt und durch Klappen leicht zu revidieren sein.

Bei den Radnabenmotoren wird das Drehmoment unmittelbar auf die Laufräder übertragen. Diese Motoren sind sowohl für leichtere Fahrzeuge als auch für Lastfuhrwerke geeignet.

Die Fahrschalter werden in der Regel als Schaltwalzen mit Kontaktfingern ausgeführt und besitzen sehr oft Einrichtungen für Kurzschlußbremsung, sowie zum sofortigen Ausschalten des Motorstromes durch eine besondere im Fahrschalter enthaltene Unterbrecherwalze, die mit der Fußbremse in Verbindung gebracht werden kann. Außerdem befindet sich in der Regel noch ein Schaltkasten mit allen erforderlichen Nebenapparaten sowie die Meßinstrumente auf dem Wagen.

Betriebskosten nach Sieg (ETZ 1908, S. 1238) in Pfennig für 1 Wagen-Kilometer: Reifenunterhaltung: 8—12 Pf. (bis 20 Pf.), Batterie: 5—8 Pf. Ladestrom: 450 Wh bei häufigem, 250—300 Wh bei seltenem Anfahren und Bremsen, gerechnet auf 1 Wagen-Kilometer. Stromkosten: bei 16 Pf/kWh: 4 Pf. Unterhaltung der elektrischen Einrichtung 1,5 Pf. Unterhaltung des Wagens 1,5 Pf. Gesamtkosten, doch ohne Führer und Schuppen 23 Pf. Elektromobile in den U.S.A. siehe EKB 1909, 531. Gleislose elektr. Automobilbahnen, ETZ 1909, S. 231. Über die Betriebsergebnisse mit Edison-Akkumulatoren, Electrical World v. 21. 7. 1910.

Neunter Abschnitt.

Elektrische Wärmeerzeugung.

Elektrisches Heizen und Kochen.

(826) Elektrische Widerstandsheizkörper. Ein elektr. Heizkörper besteht im wesentlichen aus einem Elektrizitätsleiter aus Metall, Kohle oder einem ähnlichen Stoff in Form von Draht, Band, dünner Schicht usw., der durch Glimmer, Mikanit, Asbest, Glasperlen oder andere Stoffe elektrisch isoliert ist. Seine einfachste Form ist eine Drahtspule, die in die zu erhitzende Flüssigkeit eingetaucht wird. Das ist aber nur in den Fällen anwendbar, wo die Flüssigkeit elektrisch isoliert und den Widerstandsstoff chemisch nicht angreift. Meist wird ein Widerstandsdraht zickzackförmig oder ein Band mäanderartig zwischen 2 Isolationsplatten gelegt oder um eine Isolationsplatte gewickelt und durch Einfalzen in Blech mechanisch fest gemacht. Bei älteren Verfahren wurde der mit Glasperlen isolierte Heizdraht in die Nuten einer Metallplatte eingelegt und mit Steinkitt darin befestigt, oder ein in Schamottepulver oder Schamottestücken eingebetteter Heizdraht mit Metall umgossen, oder der Heizdraht in die Emailleschicht einer emaillierten Platte eingebettet. Eine besondere Stellung nimmt das „Prometheus"-Verfahren ein, bei dem Edelmetallwiderstände in breiten dünnen Schichten anfänglich auf Emaille, später auf Glimmer, eingebrannt wurden. Dieses Verfahren gestattet auf gleichbleibender Fläche beispielsweise von 150 × 30 mm unterschiedliche Widerstände von 1—10 000 Ω herzustellen.

Für die Wahl des Widerstandsstoffes sind hauptsächlich folgende Eigenschaften maßgebend: hoher spezifischer Widerstand, geringer Temperaturkoeffizient, hoher Schmelzpunkt und geringe Oxydation. Die beiden letzteren Forderungen haben zunächst zur Verwendung von Platin geführt und bei dessen stetiger Verteuerung zur Benutzung von reinem Nickel. Dieses hat aber einen niedrigen spezifischen Widerstand und einen hohen Temperaturkoeffizienten, wodurch kleine, wenig haltbare Querschnitte des Leiters und hohe Anlaßstromstärken verursacht werden. Legierungen haben nun höheren spezifischen Widerstand und geringeren Temperaturkoeffizienten (60) und so haben sich Legierungen von Nickel, Stahl, Chrom, Mangan usw. als am zweckmäßigsten erwiesen, da es auch gelungen ist, ihren Schmelzpunkt und ihre Widerstandsfähigkeit gegen Oxydation auf eine befriedigende Höhe zu bringen. Von dem Isolierstoff wird ebenfalls hohe Temperaturbeständigkeit, beste elektr. Isolierung, möglichst gute Wärmeleitung, Dehnbarkeit usw. verlangt; er soll sich leicht bearbeiten lassen und nicht hygroskopisch sein. Diese Eigenschaften vereinigt am besten natürlicher Glimmer. Daneben kommen Asbest und sogenannter künstlicher Glimmer, Mikanit usw. in Frage.

Der Wunsch, hohe Temperaturen des Heizkörpers zu erreichen, führte auch zur Anwendung von Halbleitern, insbesondere Kohle. Sie wurde in Form kleiner Körner und gemischt mit Nichtleitern zum Herstellen verschieden hohen Widerstandes unter dem Namen Kryptol benutzt. Der hohe negative Temperaturkoeffizient, geringe Haltbarkeit der Elektroden, schneller Abbrand des Stoffes,

die notwendige Regelung usw. haben die praktische Einführung von Kohlenwiderständen verhindert; sie sind heute nur noch in Laboratorien zu finden. Eine andere Möglichkeit, die Kohle zu verwenden, ergab sich, als es B ö l l i n g [1]) gelungen war, sie mit Silizium zu tränken und dadurch unverbrennbar zu machen. Dieses „Silundum" genannte Material kann mit Temperaturen bis etwa 1700° C beansprucht werden. Es hat höheren Widerstand als Kohle und einen geringen negativen Temperaturkoeffizienten. Es wird nicht in Körnerform, sondern in Stäben runden oder viereckigen Querschnittes und in Rohren oder Formstücken verarbeitet und benutzt.

Zur Vermeidung von Metallwiderständen ist oft vorgeschlagen worden, die zu erhitzende Flüssigkeit selbst als Widerstand zu benutzen [2]). Das ist aber nur möglich, soweit die Flüssigkeit leitend ist, bzw. leitend gemacht werden kann. Meist findet dabei eine unerwünschte Elektrolyse statt, ferner wird die Flüssigkeit und ihr Gefäß spannungführend, also eine Gefahr für die Bedienung, und die Apparate werden ziemlich unhandlich. Ferner ist es schwierig, eine bestimmte Leistung des Apparates bei den vorkommenden verschiedenen Spannungen und der verschiedenen Leitfähigkeit der Flüssigkeiten einzustellen. Es haben sich deshalb solche Heizapparate nur wenig einführen können.

(827) Wärmeerzeugung durch Induktion wird heute fast nur für die besonderen Zwecke der Elektrometallurgie angewandt. Sie ist im 11. Abschnitt ausführlich beschrieben (886 C). Eine Schweizer Firma brachte um die Jahrhundertwende elektr. Heizapparate auf den Markt, bei denen eine Induktionsspule in dem umgebenden Metall Wirbelströme erzeugt und es auf diese Weise erhitzt. Auch bei diesen Apparaten war die Regulierung ziemlich schwierig; ihre Benutzung war ferner auf Wechselstromanlagen beschränkt, und sie verursachten eine unerwünschte Phasenverschiebung. Solche Apparate konnten sich ebenfalls nicht einbürgern.

(828) Wärmeerzeugung durch den Lichtbogen ist heute auf die Zwecke der Elektrometallurgie beschränkt (886 A). Im Anfang der elektr. Heiztechnik suchte man Apparate, die verhältnismäßig hohe Arbeitstemperaturen benötigten, wie Lötkolben, Brennstempel u. dgl., mit Lichtbogen zu erwärmen. Es bildete dann die Metallmasse des Apparates den einen Pol und eine bewegliche und isoliert angeordnete Kohle den anderen meist positiven Pol, zwischen denen der Lichtbogen gezogen wurde. Solche Apparate erforderten entweder eine niedrige Spannung oder bei den üblichen Leitungsspannungen besondere Vorschaltwiderstände, bzw. Drosselspulen, ferner eine dauernde Nachstellung der Kohlenelektrode zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens und waren wenig geeignet für die Benutzung durch Laien. Die punktförmige intensive Erhitzung des Lichtbogens war wohl für die genannten einzelnen Apparate erwünscht, für die meisten anderen Anwendungszwecke dagegen hinderlich, und auch solche Heizapparate haben keine größere Einführung gefunden.

(829) Aufbau elektrischer Heizapparate. Die einfachen el. Wasserkocher werden aus Messing, innen verzinnt, außen vernickelt, aus Kupfer, aus Reinnickel oder auch aus Eisen, innen und außen emailliert, angefertigt. Ursprünglich wurde ein zylindrisches Innengefäß mit einer Heizwicklung auf Asbestunterlage versehen und in ein zweites Außengefäß hineingesteckt. Jetzt werden die Wasserkocher meist nach Abb. 468 ausgeführt. Das zylindrische Oberteil ist zu einem sogenannten Heizsack verengt, auf dessen Außenseite der el. Heizkörper befestigt und durch eine zweite Schutzkappe abgedeckt wird. Die Erwärmung solcher Wasserkocher erfolgt durchweg von der Seite her durch bandförmige Heizelemente, die meist wie eine Schelle befestigt werden. Die Schutzhaube trägt die beiden Kontaktstifte für die Energiezuführung, die sich auf Federn des Heizwiderstandes aufsetzen. Sowohl die Isolierung der Kontaktstifte in der Schutzhaube, wie auch die Verlötung der letzteren am Oberteil muß nach den Verbandsvorschriften vollständig wasserdicht sein, damit ein solcher Kocher behufs Reinigung in Spül-

wasser getaucht werden kann, ohne daß die el. Heizeinrichtung durch eindringende Feuchtigkeit beschädigt wird. Manche Firmen bringen auch bei diesen Wasserkochern ein scheibenförmiges Heizelement auf dem Boden an, doch ergibt solche Beheizung eine geringere Heizfläche und auch die Befestigung des Heizkörpers ist schwieriger.

El. Kochtöpfe, wie solche für Küchenzwecke gebraucht werden, sind meist aus Kupfer, nickelplattiertem Blech, Aluminium oder Gußeisen hergestellt. Bei ihnen ist unbedingt eine Bodenheizung erforderlich, die zweckmäßig durch eine Seitenheizung ergänzt und vergrößert wird (Abb. 469). Die flachen Heizelemente werden auf den Boden aufgeschraubt, der zu diesem Zweck außen mit einer Aluminiumschicht verstärkt ist, oder an dem Verstärkungen für die Halteschrauben angegossen sind. Entsprechend ihrem größeren Inhalt werden diese Töpfe auch mit größerer Energieaufnahme ausgeführt, die dann regulierbar ist. Das Regulieren kann in einfachster Weise durch Umstecken der Zuleitungsschnur (Abb. 470) (Heizwiderstände parallel, in Reihe oder einzeln) oder durch

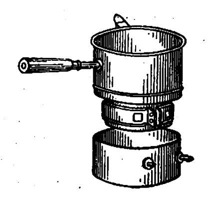


Abb. 468. Elektrischer Wasserkocher.

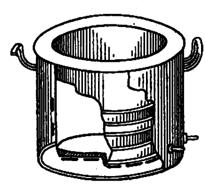


Abb. 469. Elektrischer Kochtopf.

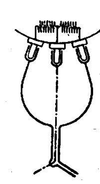


Abb. 470. Schaltung des el. Kochtopfs.

entsprechende Regulierschalter erfolgen. Einzelkochtöpfe werden meist durch Schnüre angeschlossen, wogegen in vollständigen elektrischen Küchen schnurlose Kontakte eine Vermeidung der sich verschleißenden Schnüre ermöglichen. Solche schnurlosen Kontakte werden auf einem Kochtisch angeordnet, evtl. als Aufsätze für vorhandene Kochtische geliefert, und zwar aus Metall, um eine Erdung der aufgestellten Töpfe zu erzielen[3]).

El. Heizplatten, die meist aus Gußeisen angefertigt sind, unterscheiden sich von den direkt beheizten Kochtöpfen dadurch, daß el. Heizkörper und Kochgefäß getrennt sind (Abb. 471). Das hat den Vorteil, daß auf einer Heizplatte nacheinander verschiedenste Töpfe und Pfannen benutzt werden können, aber den großen Nachteil, daß infolge der indirekten Heizung die Erwärmung ziemlich langsam und mit geringem Wirkungsgrad erfolgt.

El. Bügeleisen sind die am meisten benutzten Heizapparate. Sie sind aus Gußeisen hergestellt, meist außen vernickelt, und bestehen aus einer flachen Bügelsohle, auf der das el. Heizelement befestigt ist, und einer gewölbten Haube, die den Griff und die Kontakte trägt (Abb. 472). Diese Bügeleisen werden in allen erforderlichen Gewichten und gebräuchlichen Formen sowohl für Haushaltungen als auch für Gewerbe geliefert [4]). Infolge der dauernden Stromzufuhr bleibt das Bügeleisen gleichmäßig warm, und bei Arbeitspausen muß die Energiezufuhr abgeschaltet werden. Da bei den Bügeleisen die Arbeitstemperatur eine ziemlich hohe sein muß, so werden auch Griffe und Zuleitungsschnüre sehr heiß und verhältnismäßig schnell verschleißt. Sehr wichtig ist die geeignete Führung der Zuleitungsschnur, die von rechts oben kommend und nachgiebig aufgehängt sein soll und ferner die Einfügung eines Ausschalters, am besten eines sogenannten Steckerschalters, damit ein Ausschalten durch Abziehen des heißen Zuleitungsgriffes, das zum Abreißen der Zuleitungsschnur führt, vermieden wird.

El. Heizöfen werden als Lampen- oder leuchtende Öfen für kleine Leistungen bis etwa 1 kW, als strahlende Öfen mit Glimmerheizelementen oder als Zirkulationsöfen (Abb. 473) ausgeführt. In einem durchlochten Gehäuse einfacher oder verzierter Ausführung sind die auswechselbaren Heizwiderstände montiert, und zwar meist in einer durch 3 teilbaren Anzahl, damit die Öfen bei Drehstrom für gleichmäßige Phasenbelastung geschaltet werden können. El. Heizöfen können auch als Zieröfen oder Kamine ausgebildet werden, zu denen dann noch el. Nachahmungen der Holzscheitfeuerung benutzt werden.

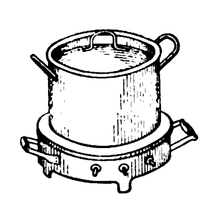


Abb. 471. Kochtopf mit el. Heizplatte.

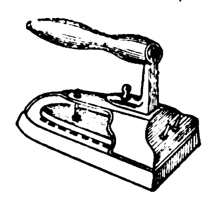


Abb. 472. Elektrisches Bügeleisen.

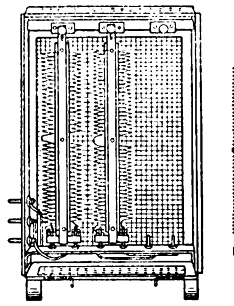




Abb. 473. Elektrischer Ofen (Zirkulationsofen).

(830) Anwendung el. Koch- und Heizapparate im Haushalt und ihre Betriebskosten. Die gebräuchlichsten Heizapparate: Wasserkocher, Bügeleisen, Brennscherenwärmer, Zigarrenanzünder, Heißluftduschen usw. haben eine Energieaufnahme bis höchstens 600 W und können ohne weiteres an vorhandene Lichtleitungen angeschlossen werden. Erwünscht ist es aber auf alle Fälle, daß, wenigstens in neueren Häusern, auch el. Kraftleitungen in möglichst vielen Räumen vorgesehen werden, so daß auch größere Apparate, wie Kochtöpfe, Heizöfen, Heizplatten u. dgl. angeschlossen und vor allen Dingen der Energieverbrauch der Heizapparate zu dem ermäßigten Krafttarif berechnet werden kann. Bei starker Benutzung el. Heizapparate empfiehlt es sich, einen besonderen Kraftanschluß herstellen zu lassen, dessen Kosten recht schnell durch die Ersparnisse in der Energieverrechnung aufgewogen werden.

Die el. Küche wird vielfach, besonders im Sommer, zur Ergänzung des Kohlenherdes verwendet [5], namentlich in solchen Haushalten, die den Kohlenherd im Winter zur Raumheizung der Küche benötigen und kein Gas zur Verfügung haben. Solche el. Ergänzungsküche benötigt nur wenige Apparate mit geringen Anschaffungskosten, und auch ihr Energieverbrauch mit etwa 0,5 kWh für den Personentag gestattet ihre Benutzung selbst bei höheren Energiepreisen. Eine vollständige el. Küche, für die ein Energieverbrauch von etwa 0,8—1,2 kWh für den Personentag in Frage kommt, bedingt Energiepreise von etwa 10 Pfg./kWh und kann dann auch mit Gasküchen wirtschaftlich konkurrieren [6]. Nachstehende Tabelle gibt den Energieverbrauch einer Anzahl verschieden großer Haushalte unterschiedlicher Lebenshaltung in dem Villenvorort einer norddeutschen Großstadt an [7]. Die zweite Tabelle gibt den Energieverbrauch und die Betriebskosten bei verschiedenen kWh-Preisen für die Herstellung einer Anzahl Speisen an.

Stromverbrauch im Haushalt.

Zahl der Haushaltungsmitglieder	6	6	5	5	4	3	3	2
	Personen							
Stromverbrauch	Kilowattstunden							
im Dez. 1912	222	193,5	84,6	115	80	46,2	82	34
,, Jan. 1913	200	89,3	120,5	118	72,6	48,8	76	26
,, Febr. 1913	190	147,8	102	110	76	57,4	72	32
,, Mäiz 1913	256	170,6	114,2	104	86	111,2	86	46
,, April 1913	162	148,8	117,8	97	53,8	60,6	89	22
,, Mai 1913	210	137,4	90,5	76	48,6	71	89	47
,, Juni 1913	230	125,1	103	37	47	74	49	31
,, Juli 1913	225	63	112	149	83	59	79	40
,, Aug. 1913	233	141,2	145	214	80	53	86	34
,, Sept. 1913	234	136	78	126	68	68	109	40
,, Okt. 1913	168	140	99	174	76	61	50	40
,, Nov. 1913	170	229	84	138	91	78	85	32
im Dez. 1913	199	121,8	117	145	79	22	75	36
,, Jan. 1914	153	118	74	84	78	9	70	36
,, Febr. 1914	182	90	108	101	100	22	70	44
,, März 1914	210	92	73	94	92	31	86	40
,, April 1914	183	136	110	108	44	38	80	38
,, Mai 1914	219	130	126	132	21	28	50	—
Dez. 1912 bis Mai 1914	3646	2409,5	1858,6	2122	1276	938,2	1383	618
Durchschnittsverbrauch im Monat .	202,6	133,8	103,3	117,9	70,9	52,1	76,8	36,4
Kosten bei 12 Pfg. für 1 kWh Mk.	24,31	16,05	12,40	14,15	8,51	5,25	9,22	4,36
Verbrauch für Person und Monat kWh . .	33,8	22,3	20,6	23,6	17,7	17,4	25,6	18,2
Für Person und Tag kWh	1,13	0,74	0,69	0,79	0,59	0,58	0,85	0,61

Erwärmung	Verbrauch Wh	Stromkosten in Pfennigen bei einem Preis der kWh von			
		8 Pf.	10 Pf.	12 Pf.	15 Pf.
1 l Wasser von 8 bis 100° zu erhitzen .	115	0,92	1,15	1,38	1,73
6 Tassen Kaffee zu kochen	130	1,04	1,30	1,56	1,95
30 ,, ,, ,, ,, ...	460	3,76	4,60	5,52	6,90
2,5 l Suppe zu kochen	480	3,84	4,80	5,76	7,20
1 großer Kopf Blumenkohl zu kochen .	350	2,80	3,50	4,20	5,25
0,85 kg Fisch zu kochen	240	1,92	2,40	2,88	3,60
1,50 ,, Rindfleisch zu kochen	320	2,56	3,20	3,84	4,80
1,50 ,, Schweinebraten herst. nebst Sauce	900	7,20	9,—	10,80	13,50
1,75 ,, Filet herstellen.	550	4,40	5,50	6,60	8,25
4 Koteletts zu braten	100	0,80	1,—	1,20	1,50
0,60 kg Kartoffeln zu rösten.	150	1,20	1,50	1,80	2,25
2,00 ,, ,, ,, kochen	380	3,04	3,80	4,56	5,70
2 Omelettes zu backen.	140	1,12	1,40	1,68	2,10
6 Eier halbhart zu kochen	50	0,40	0,50	0,60	0,75
1 Stunde zu bügeln, ohne Unterbrechung	360	2,88	3,60	4,32	5,40
1 Brennschere zu erhitzen	7	0,06	0,07	0,08	0,10

Auf die Betriebskosten der el. Küche ist das Vorhandensein, bzw. die Herstellung von warmem Wasser von beträchtlichem Einfluß. In Großstadthäusern mit Dampfheizung ist meistens warmes Wasser dauernd vorhanden, während in kleineren Orten, namentlich im Anschluß an die Überlandzentralen, die Warmwasserbereitung zweckmäßig ebenfalls mittels el. Heizung, und zwar unter Aufspeicherung in der Nacht bezogener Energie erfolgt [8]).

Für die Benutzung el. Herde ist Bedingung besonders niedriger Energiepreis, etwa von 4—6 Pfg./kWh, wenn die Betriebskosten nicht über die direkt beheizter Kochapparate hinausgehen sollen. Sie hat aber dann immer noch den Nachteil längerer Kochzeiten, so daß sie unter allen Umständen zur schnellen Bereitung kleinerer Speisemengen durch direkt beheizte Kocher ergänzt werden muß. Während beim Kohlenherd die Konzentrierung der Koch- und Bratgelegenheiten üblich und erforderlich ist, werden sie bei el. Küchen zweckmäßig dezentralisiert, d. h. die Anschlüsse für die Kochapparate vom Wärmschrank und Backofen getrennt.

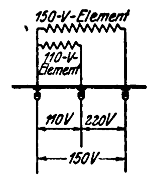


Abb. 474. Schaltung für verschiedene Gebrauchsspannungen.

El. Küchen werden auch im Großbetriebe angewendet und haben sich dort sehr gut bewährt. Der Energieverbrauch stellt sich ungefähr auf 0,4 kWh für die hergestellte Portion 9) [10]).

Benutzer el. Koch- und Heizapparate mögen diese auch auf der Reise nicht missen, und es sind besondere Reiseapparate geschaffen worden, die einen Anschluß an die unterschiedlichen, in den verschiedenen Benutzungsorten vorkommenden Leitungsspannungen gestatten. Nebenstehende Schaltskizze zeigt die Schaltung der Heizkörper und die Stöpselung der zweiadrigen Schnur auf den 3 Kontaktstiften bei den verschiedenen vorkommenden Spannungen.

(831) Elektrische Heizöfen. El. Heizöfen erfordern besonders billige Energie, wenn sie dauernd benutzt werden sollen. Das trifft zu in Gegenden mit reichen Wasserkräften, die auch meist kohlenarm sind und die weit hertransportierten Kohlen teuer bezahlen müssen. Bei den üblichen Energiepreisen wird man die el. Heizung zur Ergänzung von Kohlen- oder Dampfheizung benutzen, namentlich in den Übergangszeiten. Dann werden sich die Kosten der kurzzeitigen Benutzung des el. Ofens niedriger stellen als die Imganghaltung der Dampfheizung. Ferner kommt die el. Heizung besonders in Frage in Räumen mit explosiblen Stoffen, in Untersuchungsräumen, wo gleichmäßige Temperaturerhaltung erforderlich ist, in transportablen Räumen, wie Wagen der el. Straßenbahn, Aufzugskabinen, Unterseeboote u. dgl., ferner auch in exponiert gelegenen kleineren Räumen, wie Pförtnerhäuschen, Kommandobrücken, Krankabinen, Maschinenräume von Aufzügen, Schalträume in Bergwerken usw., deren Anschluß an die Zentralheizung nicht nur hohe Installationskosten, sondern auch auf das Vielfache gesteigerte Betriebskosten verursacht. Oft beschränkt man die Heizung auf eine Fußwärmung, indem ein besonderer Fußwärmer aufgestellt oder in den Fußboden eingelassen wird. Der Energieaufwand für eine el. Raumheizung muß von Fall zu Fall nach den örtlichen Abkühlungsverhältnissen des Raums berechnet werden. Für Überschlagsrechnungen sei erwähnt, daß für die Übergangsheizung normaler Wohnräume mit günstigen Abkühlungsverhältnissen etwa 30 W/m^3 und für Dauerheizung etwa 60 W/m^3 erforderlich sind [11]) [12]).

(832) Elektrische Heizung in Gewerbe und Industrie. Je mehr der el. Antrieb der Maschine in der Industrie Fuß gefaßt hat, um so mehr ist ihm die el. Heizung, soweit sie für den Arbeitsvorgang der Maschine erforderlich ist, gefolgt, denn es ist unzweckmäßig, für den Antrieb el. Energie und für die Erwärmung Dampf, Gas, Spiritus oder andere Brennstoffe zuzuführen, dies um so mehr, da die el. Heizung nicht nur allen höheren Ansprüchen an die Gesundheitlichkeit und Feuersicherheit gerecht wird, sondern sich auch sehr fein und wirtschaftlich regeln läßt.

So sind heute in der Papierindustrie sowohl die Präge- und Ziehpressen, wie die Anleim- und Trockenmaschinen und die Druckpressen el. erwärmt. Lack- und Paraffinschmelzkessel, Heizplatten und Trockenschränke für lackierte Waren werden el. beheizt. In der Schuh- und Lederindustrie sind Narbenpressen, Walkbacken, Klebepressen, Glätt- und Polierwerkzeuge mit el. Heizung versehen. Die Wäscheindustrie benutzt el. Bügeleisen, Bügelmaschinen, Plissiermaschinen usw. Auch viele andere Industrien wenden in steigendem Maße die el. Heizung an. So werden fast allgemein in den Arbeiterkantinen el. beheizte Wasserkessel und Wärmschränke zur Warmhaltung der von den Arbeitern mitgebrachten Speisen benutzt. Vielfach verwendet man auch in der Nacht oder zu sonstigen Zeiten überschüssige Energie zur Herstellung und Aufspeicherung von warmem Wasser, für Destillierapparate, zur Dampfbereitung usw. [13] [14]).

Literatur: 1. Bölling, Silundum, ein neues Erzeugnis des el. Ofens. Chemikerzeitung 1908, Nr. 91. — 2. Biermann, Der Tauchsieder, ein Apparat für Heißwasserbereitung. ETZ 1918, Nr. 13. — 3. Schulz, Winke für die Installation el. Koch- und Heizapparate. Helios 1918, Nr. 28, 29. — 4. Schulz, El. Heizung in Wäschefabriken und Waschanstalten. Helios 1912, Nr. 27. — 5. Schulz, El. Kochapparate als Ergänzung des Kohlenherdes. El. Anz. 1912, Nr. 41. — 6. Ritter, Das elektr. Heizen und Kochen. El. Anz. 1907, Nr. 60, 65 und 67. — 7. Schulz, Die el. Küche. El. Anz. 1914, Nr. 73 bis 78. — 8. Rittershausen, Die Verwendung von Wärmespeichern. ETZ 1912, Nr. 34. — 9. Schulz, Die el. Küche im Großbetrieb. Helios 1913, Nr. 30 und 31. — 10. Perlewitz, Das el. Kochen im Großbetrieb. ETZ 1914, Nr. 42 und 43. — 11. Schulz, El. Raumheizung. El. Anz. 1916, Nr. 79 und 80. — 12. Frank, El. Raumheizung im photographischen Institut der Techn. Hochschule Dresden. Gesundheitsingenieur, Bd. 33, Nr. 32—34. — 13. Schulz, El. Heizung im Maschinenbau. Ztschr. V. D. Ing. 1913, S. 1092. — Spezialanwendung el. Heizung für Apparate und Maschinen. Helios 1914, Nr. 7 und 8. — 14. Rutgers, El. Wärmeerzeugung für industrielle Anlagen. ETZ 1918, Nr. 26.

Elektrisches Schweißen.

(833) Arten der elektrischen Schweißung. Man kann drei Hauptgruppen, Lichtbogen- und Widerstandsschweißung und das Verfahren von Lagrange und Hoho unterscheiden. Bei den el. Schweißmethoden wird im Gegensatz zu allen anderen Schweißverfahren die Wärme nicht von außen nach innen übertragen, so daß die Wärmeverluste auf das mindeste Maß beschränkt sind. Die el. Energie wird beinahe verlustlos bis an die Schweißstelle gebracht und hier örtlich in Wärme umgesetzt.

(834) Lichtbogenschweißung. Man benutzt zur Umwandlung von el. Energie in Wärme den Lichtbogen. Als Stromart kommt hauptsächlich Gleichstrom zur Anwendung. In neuerer Zeit versucht man auch Wechselstrom für diese Zwecke heranzuziehen. Die Schweißspannung schwankt zwischen 10 und 65 V, die Schweißstromstärke zwischen 50 und 460 A je nach Größe der Schweißstücke. Die Lichtbogenschweißung zergliedert sich wieder in drei Verfahren, und zwar das Verfahren von Benardos, von Slavianoff, und von Zerener.

(835) Verfahren von Benardos. Man legt einen Pol der Stromquelle an das Schweißgut und den anderen Pol an einen Handgriff mit einer Kohlenelektrode. Der Schweißer berührt beim Lichtbogenziehen die Kohlenelektrode mit dem Schweißgut und hält den Lichtbogen in geringer Entfernung vom Schweißstück. Der Lichtbogen erweicht das Schweißstück an den zu schweißenden Kanten. Gleichzeitig schmilzt man im Lichtbogen selbst Zusatzmetallstäbe, die in die Schweißstücke einlaufen und sich mit dem Material des Schweißgutes verbinden (s. ETZ 1915 Heft 43). Das Verfahren wird heute nur noch in geringem Umfang angewendet; man findet es bei der Fabrikation von dünneren Blech-

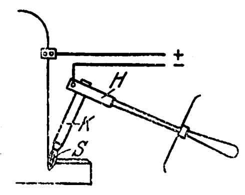


Abb. 475. Schweißverfahren von Benardos.

gefäßen (Eisenfässer u. dgl.) und bei der el. Schienenschweißung. Des Weiteren wird die Methode zum elektrischen Schneiden benutzt, indem man durch den Lichtbogen die Metallteile an der zu trennenden Stelle fortschmilzt, z. B. beim Abschneiden von verlorenen Köpfen. Des Weiteren findet man es häufig bei Abbruch- und Einschmelzarbeiten. Der Schnitt wird im Gegensatz zum autogenen Schneiden nicht glatt. Zum Schneiden verwendet man sehr hohe Stromstärken, oft bis 1000 A und mehr, bei 65 V Lichtbogenspannung.

(836) Das Verfahren von Slavianoff unterscheidet sich von dem vorhergehenden dadurch, daß man an Stelle der Kohlenelektrode direkt Metallelektroden benutzt; der Lichtbogen wird hier also zwischen Schweißgut und Metallelektroden gezogen. Die Metallelektroden selbst erweichen im Lichtbogen und fließen in die Schweißstelle ein. (s. Prakt. Maschinen-Konstr. 1919, S. 291). Das Verfahren eignet sich zur Ausführung fast aller Schweißarbeiten. Früher wurden hauptsächlich Gußreparaturen hiernach vorgenommen. In neuerer Zeit wird es mehr und mehr in der Neufrabikation zum Verschweißen von Blechen, Konstruktionsteilen aller Art, im Behälterbau, auf Schiffswerften, Dampfkesselfabriken, Eisenbahnreparaturwerkstätten usw. verwendet (s. Glasers Ann. 1917, Nr. 972 und General El. Rev., Bd. 21, Nr. 12, 1918). Der Hauptfortschritt wurde durch die Verwendung von überzogenen Metallelektroden erzielt. Die überzogenen Metallelektroden gestatten eine Konzentrierung des Lichtbogens. Es ist damit möglich, horizontal wie vertikal, wie „über Kopf“ Nähte zu schweißen. Anhaltspunkte über Schweißleistung, Energieverbrauch, Elektrodenverbrauch nach dem Slavianoffschen Verfahren werden in Tabelle 1 gegeben.

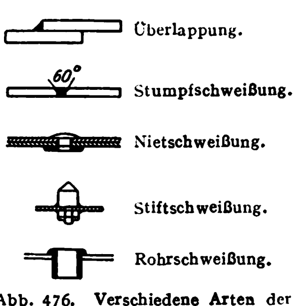


Abb. 476. Verschiedene Arten der Schweißung.

(837) Verfahren von Zerener. Die Pole einer Gleichstromquelle werden an zwei schräg zueinander gestellte Kohlenelektroden angeschlossen, in deren Mitte ein Blasmagnet eingebaut ist, der bewirkt, daß der gezogene Lichtbogen stichflammenartig gerichtet wird. Der Lichtbogen bildet sich hier also zwischen Kohle und Kohle und erhitzt das darunter gebrachte Schweißstück nebst Zusatzmaterial auf Schweißhitze. Das Zerenersche Verfahren hat als eigentliches Schweißverfahren heute nur noch geringe Bedeutung, dagegen verwendet man die Zerenersche Lampe heute noch hier und da zum Hartlöten (vgl. Prakt. Maschinenkonstr. 1919, S. 291)

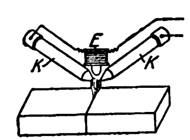


Abb. 477. Schweißverfahren von Zerener.

(838) Maschinen. Für alle Lichtbogenschweißverfahren empfiehlt es sich, Spezialmaschinen zu verwenden, die auf konstantem Strom arbeiten (s. Querfeldmaschine (418), ETZ 1906, S. 1035, 1061 und Gleichstrommaschinen in Krämerscher Schaltung ETZ 1909, S. 798). Unter Verwendung solcher Maschinen wird die gesamte erzeugte Energie ausgenutzt. Bei Verwendung von gewöhnlichen Nebenschlußmaschinen oder bei direktem Anschluß an Gleichstromnetze müssen vor die Schweißstelle Widerstände geschaltet werden. In solchen Widerständen wird ein großer Teil der Energie vernichtet und der Betrieb gegenüber den Konstantmaschinen verteuert. — Wie eingangs erwähnt, versucht man neuerdings auch Wechselstrom für die Lichtbogenschweißung zu benutzen. Der Lichtbogen läßt sich jedoch hierbei schwerer halten als bei Gleichstrom und verlangt geübtere Arbeitskräfte. Die Schweißspannung bei Wechselstromschweißung ist höher als bei Gleichstrom zu wählen.

Tabelle 1.

Lichtbogenschweißung mit Metallelektroden.

Blechstärke mm	Stärke der Elektroden mm	Strom A	Art der Schweißung vgl. Abb. 476	Arbeitsgeschwindigkeit m/h	kg Draht auf 1 m Nahtlänge
1,58	1,58	30	Überlappung	4,86	—
3,17	3,92	100	Überlappung	3,35	0,2075
3,17	3,92	95	Stumpfschweißung	2,28	0,34
4,76	3,92	130	Überlappung	3,04	0,325
4,76	3,92	117	Stumpfschweißung	1,92	0,459
6,35	3,92	140	Überlappung	1,82	0,502
6,35	3,92	137	Stumpfschweißung	1,13	0,74
9,52	3,92	140	Überlappung	1,219	0,695
9,52	3,92	140	Stumpfschweißung	0,762	0,83
12,70	4,76	150	Überlappung	1,097	0,8
12,70	4,76	150	Stumpfschweißung	0,609	1,48
15,87	4,76	165	Überlappung	0,609	1,48
15,87	4,76	165	Stumpfschweißung	0,405	2,15
19 mm Niet	3,92	135	Ersatz für Verstemmen	2 min. für 1 Niete	0,1 für 1 Niete
Prisonstift mit 12 mm Blech	3,92	150	Ersatz für Verstemmen	22 min. für 1 Schweißung	0,18 für 1 Stift
50 mm Kesselrohr mit 6,3 bis 3,1 mm Blech	3,92	135	Spezialschweißung	3 min. für 1 Schweißung	0,059 für 1 Rohr

(839) Widerstandsschweißung. Zur Umwandlung der el. Energie in Wärme wird der innere Widerstand und der Übergangswiderstand des Schweißstückes selbst benutzt. Die Schweißspannungen liegen hierbei außerordentlich niedrig; sie schwanken zwischen 0,5 und 10 V je nach Größe und Art des Schweißstückes. Die Stromstärken müssen außergewöhnlich hoch sein; sie gehen oft in die Größenordnung von über 100 000 A. Zur Verwendung gelangt fast ausschließlich Wechselstrom, da der Transformator das einfachste Hilfsmittel ist, den Strom der gebräuchlichsten Spannung auf solchen von niedriger Spannung umzuwandeln (s. ETZ 1915, Heft 43/44, Prakt. Maschinenkonstr. 1919). Die Widerstandsschweißung zerfällt in das Stumpf-, Punkt- und Nahtschweißverfahren.



Die **Stumpfschweißung** umfaßt alle Schweißarbeiten, die eine Stoßverbindung verlangen, wie dies bei der Verbindung von Rundeisen, Profilen, Ringen, Schnallen, Kettengliedern usw. vorkommt. Die Hauptbedingung für das Gelingen der Schweißung selbst ist gleicher Querschnitt an den zu vereinigenden Schweißenden. Der Schweißvorgang selbst beim Stumpfschweißen beschränkt sich auf das Einspannen der zu vereinigenden Schweißstücke, worauf der Schweißstrom eingeschaltet wird. Die Schweißhitze entwickelt sich von innen nach außen und tritt innerhalb weniger Sekunden ein. Die Entwicklung der Schweißhitze läßt sich einwandfrei verfolgen, so daß ein Verbrennen des Schweißgutes ausgeschlossen erscheint. Wenn die Hitze auf der Außenhaut ersichtlich ist, muß der ganze Schweißquerschnitt erhitzt sein. Nach eingetretener Schweißhitze werden die zu vereinigenden Stücke gegeneinander gestaucht und gleichzeitig der Strom ausgeschaltet. Die Schweißung als solche ist hierdurch beendet. Die entstandene Stauchwulst kann in derselben Hitze, mit der das Stück geschweißt wurde, wieder gepreßt oder gehämmert werden. Da bei der Schweißung kein Fremdmaterial in die Schweißstelle gelangen kann, so bleibt das Material außerordentlich rein; die Schweißung ist in metallurgischer Hinsicht ideal zu nennen.

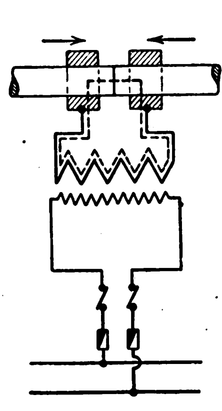


Abb. 478. Elektrisches Stumpfschweißen.

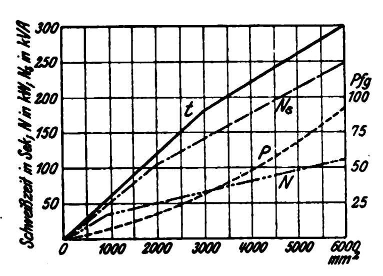


Abb. 479. Zeit- und Stromverbrauch beim Schweißen von Eisen verschiedener Querschnitte.

Mittels der Stumpfschweißung lassen sich Eisen, Temperguß, Stahl, Kupfer, Messing und Aluminium schweißen. Hochwertige Stähle schweißt man nach dem sogenannten **Abbrenn-** oder **Abschmelz**verfahren (s. ETZ 1919, Heft 40). Das Abschmelzverfahren unterscheidet sich vom gewöhnlichen Widerstandsverfahren dadurch, daß die Schweißstücke von vornherein nicht gegeneinander gestoßen werden, sondern zuerst wird der Strom eingeschaltet und hiernach die Schweißstücke genähert, bis beim Berühren der Schweißquerschnitte der Strom in Form von Funken überspringt, wodurch die Stoßstellen auf Schweißhitze gelangen. Hierauf werden die zu vereinigenden Teile schlagartig ineinandergestaucht. Eventuell noch im Querschnitt gebliebene geschmolzene Metallteilchen quetschen sich hierdurch heraus. Das Verfahren eignet sich insbesondere zur Herstellung von Schneidwerkzeugen aller Art, zum Schweißen von komplizierten Querschnitten und Rohren. Einen Überblick über Energie- und Zeitverbrauch beim Schweißen der verschiedenen Eisenquerschnitte bis 6000 mm² gibt die Kurve der Abb. 479. Gleichgroße Kupferquerschnitte benötigen ungefähr dreimal soviel Energie wie die entsprechenden Eisenquerschnitte. Geschlossene Teile, wie Ringe, Schnallen, Kettenglieder u. dgl. erfordern mehr Energie wie offene, nicht in sich geschlossene Schweißstücke.

Die **Punktschweißung** eignet sich speziell zum Verbinden von Blech- und Eisenkonstruktionen u. dgl. als Ersatz für das frühere Nieten. Punktweise

lassen sich Eisen-, Messing-, Zink- und Aluminiumbleche schweißen. Die Blechstärken der zu verbindenden Teile erfahren nach unten keine Begrenzung; da der Strom feinfühlig regulierbar ist, lassen sich die dünnsten Bleche ohne Verbrennungsgefahr schweißen. Die oberen Blechstärken für Punktschweißverbindungen liegen heute bei etwa 25 mm Dicke. Punktschweißverbindungen haben gegenüber Nietverbindungen eine höhere Festigkeit, da eine Materialschwächung durch das Lochen, wie es beim Nieten erforderlich ist, wegfällt. Einen Anhaltspunkt über Schweißzeit, Energieverbrauch gibt Abb. 481. Das Verschweißen von Stücken, bei denen größere Eisenmassen zwischen die Schweißelektrodenarme gelangen, erfordert mehr Energie (Blechzylinder) als von solchen Stücken, wo nur verhältnismäßig geringe Eisenmassen zwischen die Elektrodenarme gelagert werden. Die Anwendung der el. Punktschweißung ist durch die Ausladung der Elektrodenarme beschränkt. Die maximale Ausladung der Elektrodenarme liegt etwa bei 1 m.

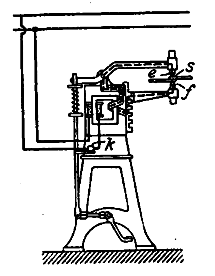


Abb. 480. Elektrische Punktschweißung.

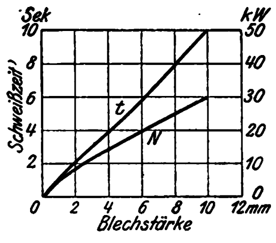


Abb. 481. Zeit- und Stromverbrauch beim Schweißen von Eisenblech.

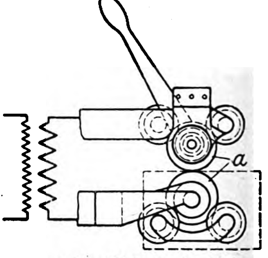


Abb. 482. Elektrische Nahtschweißung.

Bei der Nahtschweißung (Abb. 482) werden die zu verbindenden Bleche zwischen zwei unter Druck stehenden stromführenden Kupferrollen hindurchgezogen. Die Nahtschweißung gestattet die Verbindung von Eisenblechen, Messing- und Zinkblechen. Die größte nahtweise zu verbindende Blechstärke liegt etwa bei 2 mm. Nach unten ist die Blechstärke unbegrenzt. Es lassen sich die dünnsten Bleche ohne Schwierigkeit einwandfrei schweißen. Die Nahtschweißung kann sowohl in der Längsnaht wie in der Rundnaht durchgeführt werden. Die Schweißgeschwindigkeit schwankt je nach Blechstärke zwischen 2—50 mm/s. Die Festigkeit nahtgeschweißter Bleche beträgt bis über 100 % des Materials selbst. Geschweißte Zylinder können nachträglich geformt, gedrückt und gepreßt werden.

(840) Das Verfahren von Lagrange und Hoho beruht auf elektrolytischer Wirkung. Das zu schweißende Stück bildet die eine Elektrode, die Gegenelektrode stellt eine Bleiplatte dar, welche in einen Bottich mit angesäuertem Wasser eintaucht. Die Schweißung erfolgt unter Wasser. Beim Stromdurchgang von 110 V erfolgt eine Wasserstoffentwicklung um das Schweißstück herum. Der Wasserstoff setzt dem Durchgang des Stromes einen hohen Widerstand entgegen, so daß sich um das Schweißgut eine außerordentliche Hitze entwickelt und das Schweißgut an den zu schweißenden Enden auf Schweißhitze bringt. Die Vereinigung der erhitzten Schweißenden erfolgt durch Hammer und Ambos außerhalb des Wasserbades. Die Spannung und Stromstärke der Stromquelle richten sich nach der Größe der eingetauchten Oberfläche des zu erhitzenden Schweißgutes. Die Spannung beträgt bei 5 cm Oberfläche etwa 110 V; auf 1 cm² der eingetauchten Oberfläche können etwa 5 A gerechnet werden. Das Verfahren findet heute nur noch selten Anwendung.

Zehnter Abschnitt.

Die Elektrizität auf Schiffen.

(841) Stromsystem und Umfang. Da auf Schiffen eine andere als die elektrische Beleuchtung kaum in Frage kommt, sind fast alle Schiffe wenigstens mit einer Dynamomaschine ausgerüstet. Die allgemein übliche Stromart ist Gleichstrom; Drehstrom ist nur vereinzelt, besonders auf Tankdampfern, verwendet worden wegen der Explosionssicherheit und Einfachheit der Motoren mit Kurzschlußläufer (Hibbard, El. Review, 4. 1. 1918).

Die Spannung beträgt meist 110 bis 120 V, auf Schiffen mit überwiegendem Verbrauch für Kraft 220 oder 240 V, wobei das Lichtnetz bei besonders sorgfältiger Installation ebenfalls mit dieser Spannung betrieben werden kann; andernfalls wird die niedrige Lichtspannung durch Umformer oder Mittelleiter und Spannungsteiler hergestellt. Kommandoapparate, Kreiselkompaß, Funkentelegraphie und Unterwasserschallsignalanlage erfordern Umformer für besondere Stromarten.

Über den Umfang der elektrischen Anlagen einiger größerer Schiffe sind die Hauptdaten in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

Name des Schiffes	Primärmaschinen			Anschlußwert der Verbraucher kW				
	Anzahl	Leistung 1 Masch kW	Gesamtleistung kW	Beleuchtung	Scheinwerfer	Heizung	Motoren	Befehlsübermittlung
Schnelldampfer „Deutschland" 16500 Br.Reg.-T. (1900)	5	60	300	200	—	16	70	3
Schnelldampfer „Vaterland" 54200 Br.Reg.-T. (1914)	5 1	288 50	1490	700	—	400	700	25
Motorfrachtschiff „Secundus" 4500 Br.Reg.-T. (1914)	2 1	140 15	295	10	—	—	480	—
Linienschiff „Baden" (1916)	4 2 4	400 300 75	2500	200	1200	—	3000	140

(842) Stromerzeuger sind gegen Tropf- und Schwitzwasser zu schützen und für deutsche Handelsschiffe nach den Vorschriften des VDE auszuführen, wobei für Schiffe der Tropenfahrt mit 45° Raumtemperatur zu rechnen ist.

Für Dampfdynamos hat der Handelsschiffs-Normalien-Ausschuß folgende Leistungsreihe festgesetzt:

2,5; 5 kW bei 500 U/min. 20, 25 kW bei 350 U/min.
7,5; 10 „ „ 450 „ 30, 40, 50 „ „ 325 „
12,5; 15 „ „ 400 „ 75, 100 „ „ 300 „

Bei 45° Raumtemperatur verringern sich die Leistungen um 14%, während sich die Drehzahlen um 6% erhöhen.

Turbodynamos ermöglichen 40—50% Raum- und Gewichtsersparnis gegenüber Kolbendampfmaschinen und werden auf Turbinenschiffen mit Rücksicht auf die Reinhaltung des Kondensates von Öl fast ausschließlich verwendet. Die Drehzahlen betragen je nach Größe 2000 bis 6000 U/min. In Amerika verwendet man Turbinen mit Rädervorgelege und normalen Dynamomaschinen.

Öldynamos werden hauptsächlich auf Motorschiffen, aber auch auf Dampfern als Notmaschinen oder für Hafenbetrieb verwendet. Kleinere Motoren erhalten Glühkopfzündung, größere von etwa 60 kW an werden als Dieselmotoren ausgeführt. Zur Abgabe der Spitzenleistung z. B. für den Betrieb der Ladewinden wird die Drehzahl bisweilen um etwa 50% erhöht, während die Spannung durch Nebenschlußregelung konstant gehalten wird.

(843) Verteilungssystem. Auf Kriegsschiffen wird die Zentrale in 2 bis 4 voneinander unabhängige Stationen unter Panzerdeck unterteilt, die sich gegenseitig

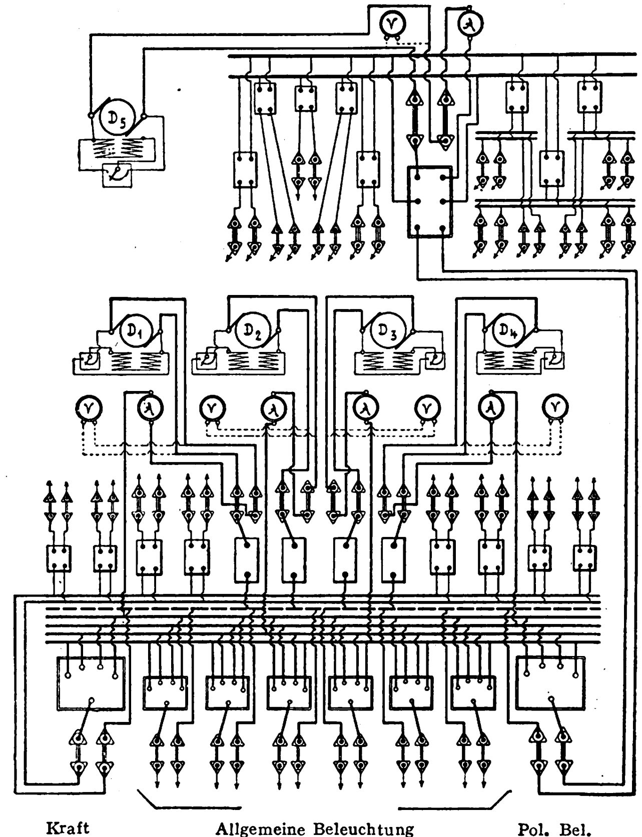


Fig. 483. Schaltanlage des Schnelldampfers „Deutschland".

unterstützen. Jeder Stromkreis wird an 2 Stationen angeschlossen. Parallelschaltung der Maschinen wird vermieden.

Auf Handelsschiffen arbeiten die Generatoren entweder in Parallelschaltung, und zwar zweckmäßig auf getrennte Sammelschienen für die

Lichtstromkreise und die Kraftstromkreise, oder in Einzelwahlschaltung derartig, daß jeder Stromkreis mittels eines mehrfachen Umschalters auf jeden einzelnen Generator wahlweise geschaltet werden kann (Abb. 483). An die Reservestation, die auf Fahrgastschiffen über der Wasserlinie vorgesehen werden muß, ist die Not- oder Polizei-Beleuchtung angeschlossen, die ein unabhängiges Notbeleuchtungsnetz mit einer genügenden Anzahl von Stromkreisen umfaßt, durch welche in den Wohnräumen und Mannschaftsräumen, in allen Gängen, an den Niedergängen und Luken sowie auf der Kommandobrücke und in den Maschinen- und Kesselräumen so viel Lampen im Betrieb erhalten werden, wie für den Dienst und die Benutzung dieser Räume gerade hinreicht. Auch die Positionslichter und die Station für Funkentelegraphie sind an das Notbeleuchtungsnetz anzuschließen.

(844) Die Leitungsanlage wird entweder als Doppelleitersystem mit besonderer Hin- und Rückleitung oder, bis 110 V, als Einleitersystem mit dem Schiffskörper als Rückleitung ausgeführt. Letzteres ist für deutsche Handelsschiffe die Regel. Innerhalb der Kompaßzone von 5 m Radius und auf Tankschiffen ist doppelpolige Verlegung vorgeschrieben.

Es sind mindestens folgende getrennte Stromkreise zu verlegen: Dauerbeleuchtung, bei Tage abschaltbare Beleuchtung, Notbeleuchtung, Kraft und Heizung. Bis 16 Lampen werden von einer Zweigleitung gespeist; diese zweigen von den Hauptleitungen auf den in verschließbaren Kästen untergebrachten Verteilungsschalttafeln ab. Alle Hauptleitungen sowie Zweigleitungen in Mannschafts-, Maschinen- und Kesselräumen, Bunkern, Lade-, Kühl- und Waschräumen, Küchen, Bädern, Klosetts und anderen feuchten Räumen, für Außenlampen und für Motoren sind als eisenbandarmierte Bleikabel, alle übrigen Zweigleitungen als Gummiaderleitungen in Holzleisten zu verlegen.

Decksdurchführungsrohre und Schottstopfbuchsen dienen zur wasserdichten Durchführung der Kabel (Kennedy, Electrician 11. 4. 1919).

Das Installationsmaterial der deutschen Handelsmarine, insbesondere Schalter, Stecker, Abzweigdosen, Sicherungen, ist genormt. Sicherungen bis 200 A werden als Patronensicherungen nach dem Diazedsystem (679), über 200 A als Streifensicherungen ausgeführt.

(845) Beleuchtung. Für deutsche Handelsschiffe erhalten Glühlampen bis 50 HK Swanfassung, lichtstarke Glühlampen Goliathfassung. Die Beleuchtungskörper, insbesondere Zwischendecklampen (s. Abb. 484), Maschinen- und Heizraumlampen, flache Decklampen, Laderaumlampen, Sonnenbrenner, Handlampen, Steh- und Wandlampen sind genormt.

Mit den 32 HK-Positionslaternen werden Kontrollampen auf einer Schalttafel im Steuerhaus in Reihe geschaltet.

Für allgemeine Raumbeleuchtung ist auf 1 m² Bodenfläche mit folgenden Lichtstärken in HK zu rechnen: Bunker 0,75, Laderäume 0,75—1, Tunnel, Bootsdeck 1, Promenadendeck, Gänge, Heizraum, Mannschaftsräume 2, Offizierskammern 2,5, Fahrgastkammern 2,5—4, Zwischendeck, Maschinenraum 3, Waschräume 3—4, Wirtschaftsräume, Hospital, Turnhalle, Klosetts 4, Salons II. Kl. 6—9, Luxuskammern 7—8, Salons und Vorplatz I. Kl. 9—11 (Müller, Schiffbau 8. 10. 1919).

Abb. 484. Zwischendecklampe.

(846) Scheinwerfer, hauptsächlich auf Kriegsschiffen verwendet, bestehen aus horizontalen Bogenlampen für 20 bis 200 A, deren Lichtbogen im Brennpunkte eines Parabolspiegels von 35 bis 200 cm Durchmesser erzeugt wird. Um sofort Licht geben zu können, läßt man die Lampe hinter der lichtdicht schließenden Irisblende brennen oder rüstet sie mit der von den Siemens-Schuckertwerken geschaffenen Schnellzündung

aus. Zum Signalisieren dient ein Jalousieverschluß, zum Ausbreiten des Strahles der Streuer aus zylindrisch geschliffenen Glasstreifen. Zum Schwenken und Neigen dient Hand- oder elektromotorischer Fernantrieb (Krell, ETZ 1915, Heft 32—38).

Handelsschiffe verwenden im Suezkanal einen 50 cm-Scheinwerfer mit 15° Streuung und 5° dunklem Mittelfeld, damit begegnende Schiffe nicht geblendet werden.

Scheinwerfer größerer Leistung werden durch Umformer mit abfallender Charakteristik gespeist (Krell und Stauch, Deutscher Schiffbau 1913).

(847) Elektrische Heizung wird auf großen Fahrgastdampfern vielfach verwendet. „George Washington" besitzt 160 Öfen von 5 bis 25 A (Thilo, ETZ 1910, S. 5); auf „Vaterland" wird in den Kabinen I. Kl. selbsttätig geregelte elektrische Zusatzheizung verwendet; in Konditorei und Bäckerei werden die Backöfen, in den Küchen einzelne Kocher elektrisch beheizt (Stauch, ETZ 2. 10. 1919; Mauger, Am. Inst. El. Eng. 19. 5. 1914).

(848) Elektrische Hilfsmaschinen. Ankerwinden müssen Anker mit 100 m Kette mit etwa 12 m/min. Geschwindigkeit heben können. Sie werden angetrieben durch umsteuerbare Hauptstrommotoren mit Steuerwalze oder Schützensteuerung und Überstromschalter.

Bootswinden- und Krane zum Heben der schweren Beiboote mit etwa 20 m/min. Geschwindigkeit erfordern Kompoundmotoren mit Haltebremse, die mit Schützensteuerung oder in Leonardschaltung betrieben werden. Die Bootswinden auf den Handelsschiffen erhalten meist durchlaufende Motoren mit Spillköpfen oder mechanischen Kupplungen.

Abb. 485. Ladewinde mit Schützensteuerung. Atlaswerk SSW)

Rudermaschinen. Die nur kurzzeitig abzugebende größte Motorleistung errechnet sich aus größtem Rudermoment (s. Hütte, Schiffselemente) und der dabei auftretenden Geschwindigkeit. Bei nicht selbstsperrendem Getriebe muß der Motor eine Stoppbremse erhalten. Wegen des häufigen Anlaufens ist mäßige Drehzahl und geringes Schwungmoment anzustreben und die Schaltapparate sind für sehr häufiges Schalten auszubilden (Stauch, Schiffbau IX, 21—24, X, 1—2). Die direkte Steuerung ohne Rückstellung des Schaltorgans durch die Rudermaschine eignet sich am besten für den elektrischen Betrieb (Hibbard, Am. Inst. El. Eng. 19. 5. 1914; Schiffbau 10. 12. 1919).

Ladewinden. Die meist benutzten Typen sind Räderwinden mit doppeltem umkuppelbarem Vorgelege für 5/2 t bei 0,3/0,75 m/s, 18 kW und 3/1,2 t bei 0,3/0,75 m/s, 11 kW; Geschwindigkeit des leeren Hakens etwa 1,4 m/s. Antrieb durch Hauptstrommotor in Sicherheitssenkbremsschaltung oder Kompoundmotor. Schützensteuerung, wobei Schützen und Widerstände in einem besonderen Raume zusammengefaßt sind, wird vielfach bevorzugt (Abb. 485) (Whitney, Gen. El. Rev. Febr. 1918; Bahl, Jahrb. Schiffbautech. Ges. 1921; Engineer 16. 5. 1919).

Kohlenwinden. Auf Kriegsschiffen dienen zur schnellen Bekohlung Ladewinden oder etwa 14 bis 18 transportable Kohlenwinden mit 2 Spillköpfen für je 260 kg bei 1 m/s (Krell, ETZ 1915, Heft 32).

Munitionswinden werden entweder mit hin- und hergehendem Fahrkorb oder als Becherwerke mit dauernd durchlaufendem Motor ausgeführt. Auch Spillkopfwinden (Munitionswippen) kommen für leichte Munition in Betracht.

Für Höhen- und Seitenrichtmaschinen der schweren Geschütze ist weitgehende Geschwindigkeitsregelung, etwa 1 : 100, erforderlich, wozu sich Leonardschaltung mit besonders ausgebildeten remanenzlosen Generatoren eignet.

Ventilatoren, Pumpen und Kompressoren, sowie Werkzeug- und Wirtschaftsmaschinen werden ähnlich wie in Landanlagen elektrisch angetrieben.

Motoren und Apparate an Oberdeck müssen zuverlässig wasserdicht gekapselt sein; unter Deck ist ventiliert gekapselte Ausführung am zweckmäßigsten. Die Isolation muß besonders widerstandsfähig gegen Feuchtigkeit sein. Die Lager müssen die zu erwartende Schräglage aushalten. Anlasser müssen bei ausbleibender Spannung selbsttätig ausschalten.

(849) Die Kommandoapparate dienen zur sicheren Übermittlung der Kommandos von den Befehlsstellen. Besonders kommen in Betracht: Maschinentelegraphen, Steuertelegraphen und Ruderlagezeiger, Kesseltelegraphen zur Verständigung zwischen Maschinen- und Kesselraum; Verholtelegraphen zur Verständigung mit Vorder- und Hinterschiff beim Verholen; ferner Artillerie- und Torpedotelegraphen. Für den Betrieb dieser Apparate sind zahlreiche Systeme für Gleichstrom wie für Wechselstrom in Gebrauch. Letztere werden bei größeren Anlagen bevorzugt, da sie den Magnetkompaß nicht beeinflussen und gegen Isolationsfehler verhältnismäßig unempfindlich sind (Krell und Stauch, Deutscher Schiffbau 1913).

Als Richtungsweiser benutzen Kriegs- und große Fahrgastschiffe den Kreiselkompaß. Bei der Ausführung von Anschütz werden die 3 Kreisel des Mutterkompasses durch Wechselstrom von 333 Per/s angetrieben und stellen ihre resultierende Achse in den geographischen Meridian an. Diese Stellung wird elektrisch auf beliebig viele Tochterkompasse übertragen (Anschütz-Kämpfe, Jahrbuch Schiffb. Ges. 1909; Brown, Engineering 13. 2. 1920; Martienssen, ETZ 1911, S. 862, 887; Nauticus, 1913).

(850) Fernsprecher dienen als Schiffsfernsprecher dem allgemeinen oder als Lautfernsprecher dem Dienstverkehr, besonders von der Brücke nach dem Maschinenraum, nach vorn und hinten. Sie werden durch Akkumulatorenbatterien von 12 V gespeist, die durch Widerstand oder Umformer geladen werden.

(851) Anlagen für Funkentelegraphie erhalten alle Kriegsschiffe und Fahrgastschiffe sowie größere Frachtschiffe. Für Fahrgastschiffe ist ein vom Maschinenstrom des Schiffes unabhängiger Notsender vorgeschrieben. Hauptverkehrswellenlänge für Handelsschiffe 600 m, im Verkehr mit Küstenstationen 1800 m. Der Dampfer „Imperator" wurde ausgerüstet mit 1 großen und 2 kleinen Antennen, 2 Empfangsanlagen, 1 Großstationssender für 1500—3000 km Reichweite, etwa 16 kW, 1 Kleinstation für 600—1200 km, 4 kW; 1 Notsender für 200 bis 400 km mit Batterie (Bredow, Jahrb. Schiffb. Ges. 1914).

(852) Unterwasserschallsignale. In dem Elektromagnetsender der Signal G. m. b. H.-Kiel werden die für Schwingungserzeugung im Wasser erforderlichen großen Drucke bei kleinen Wegen (0,01 mm) erzeugt durch Kopplung der kleinen Masse des Magnetankers mit der großen Masse der Membran durch longitudinal schwingende Stäbe und Rohre. Die Membran bildet einen Teil der Schiffswand; ihre Schwingungen werden zu Morsezeichen benutzt. Die Erregung erfolgt durch Wechselstrom von 1050 Per/s. Energiebedarf 300—800 W. Der Sender der Atlaswerke Bremen beruht auf der elektrodynamischen Wirkung der in einem Hohlzylinder erzeugten Wechselströme im magnetischen Felde. Als



Empfänger dienen Mikrophone, die Geber selber in Verbindung mit Telephonen oder mechanisch-akustische Einrichtungen (Hahnemann, Jahrb. Schiffb. Ges. 1920; Phys. Zeitschr. 1919, S. 104). Reichweite im Sommer etwa 7, im Winter 18 km (Licht, Phys. Zeitschr. 1919, S. 385). Anwendungsgebiet: Ansteuern fester Punkte und Ersatz der Positionslaternen bei Nebel, Eisberg- und Tiefenbestimmung, Signalmittel für Kriegsschiffe, Telephonie (Kunze, Werft und Rhederei 7. 7. 1920).

(853) Der elektrische Propellerantrieb zeichnet sich durch Anpassungsfähigkeit an Betriebs- und Raumverhältnisse, den Wegfall der Rückwärtsturbinen und die dadurch erreichte Betriebssicherheit aus. Bei dem V. St. Linienschiff New Mexico (Abb. 486) werden die Schrauben durch 4 von 36 auf 24 Pole umschaltbare Zweiphasenmotoren mit Doppelkurzschlußanker für je 5000 bis 6250 kW Wellenleistung bei 4000 V und 173 U/min. angetrieben, die über Motortrennschalter, Polumschalter, Fahrtrichtungsschalter und Generatorschalter bis 17 Knoten von einem, darüber, bei geöffnetem Verbindungsschalter von 2 2poligen Generatoren gespeist werden. Umschaltungen erfolgen stromlos nach Unterbrechung der Generatorerregung; zur Erreichung der Zwischenstufen wird die Geschwindigkeit der Antriebsturbine verändert (Gen. El. Rev. April 1919, Stauch, ETZ 8. 4. 1920).

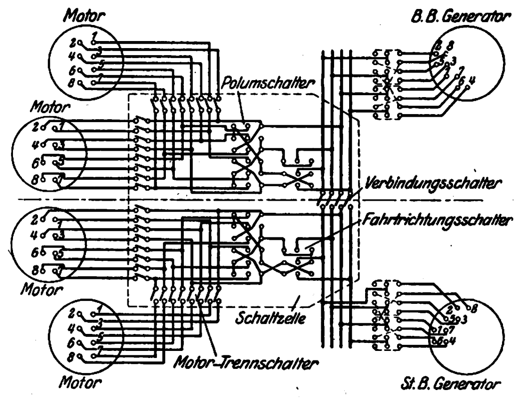


Abb. 486. Elektrischer Antrieb der Schiffschrauben.

Für turboelektrischen Antrieb von Frachtdampfern ist die Ljungström-Turbine besonders geeignet (Nielson, Electrician 10. 4. 1919; Wintermeyer, Schiffbau 23. 4. 1919; ETZ 1920, S. 235).

Unterseeboote erhalten gewöhnlich auf jeder Schraubenwelle einen Ölmotor, einen Doppelelektromotor und Kupplungen. Die Geschwindigkeitsregulierung erfolgt im Motorfeld und durch Serien-Parallelschaltung der Motorhälften. Sämtliche Hilfsmaschinen werden elektrisch angetrieben (Berling, Jahrb. Schiffb. Ges. 1913; Krell, ETZ 1915, 32—38; Schürer, Schiffbau 25. 6. 1919; Coleman, El. Journ. Juli 1919).

Mehrfach sind Lastkähne, Fähren, Boote durch Gleichstrommotoren und Akkumulatoren angetrieben worden, die von Land oder durch Öldynamo an Bord geladen werden (Deetjen, ETZ 1908, S. 1159; Reich, ETZ 1909, S. 148). Bei elektrischer Treidelei wird das Fahrzeug durch eine elektrische Lokomotive, welche auf Schienen am Ufer fährt, gezogen (Meyer, El. Kraftbetr. u. B. 14. 11. 1908, Zehme, ETZ 1909, S. 380; Block, ETZ 1906, 22—25).

Elfter Abschnitt.

Elektrochemie.

(854) Gegenstand. Unter Elektrochemie versteht man alle Beziehungen zwischen elektrischer und chemischer Energie. Sie umfaßt daher auch elektrochemische Stromerzeugung und Stromspeicherung. Die oft mit thermischer Energie zusammenwirkenden elektrochemischen Prozesse können sowohl zerlegend als aufbauend wirken. — Der Vollständigkeit halber sind auch die Trennungen von Gemengteilen durch Kataphorese, statische und magnetische Stromwirkungen aufgenommen, obwohl wir es dabei nicht mit elektrochemischen Verfahren im eigentlichen Sinne zu tun haben.

(855) Elektrolyse. Sie beweckt die Scheidung chemischer Verbindungen in ihre Bestandteile. — Sie bedarf eines flüssigen Elektrolyts, sei es in wässeriger oder anderer kalter oder heißer Lösung, sei es im geschmolzenen Zustande. Es können die Elemente als solche gewonnen werden (z. B. Wasserzersetzung in H und O) oder es wird nur Anion oder Kation in elementarer Form gewonnen (Cl bei der Chloridelektrolyse, das Metall bei der elektrolytischen Metallgewinnung), während der andere Bestandteil andere Verbindungen eingeht (z. B. NaOH bei der Kochsalzelektrolyse, Lösen neuen Metalles aus der Anode bei elektrolytischen Raffinationsverfahren). Endlich können beide Bestandteile neue Verbindungen eingehen (z. B. Hypochlorit, Chlorat bei der Chloridelektrolyse bei bestimmter Arbeitsweise). Die Abscheidung von Ionen gleicher Art richtet sich nach ihrer chemischen Natur. Metallische Kationen scheiden sich um so leichter ab, je edler, elektronegativer das Metall ist. Die Elektrolyse bedarf in weitaus den meisten Fällen des Gleichstroms. Die Verwendung von Wechselstrom ist nur in wenigen Ausnahmefällen möglich.

Das Wesen der Elektrolyse und die günstigsten Bedingungen für ihre Ausübung sind weitgehend erforscht. Da aber die nutzbare Stromarbeit von vielen, sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren abhängt, sind bei der Ausbildung elektrolytischer Verfahren sorgfältig durchgeführte Dauerversuche erforderlich. Insbesondere sind vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkte festzustellen: Die Spannung, welche zur Überwindung der Polarisation und der inneren und äußeren Widerstände erforderlich ist, Stromstärke, Stromdichte, Material, Form und Einbau der Elektroden, Kontakte, Temperatur, eventuelle Anwendung von Diaphragmen, Zu- und Abfluß, bzw. Zirkulation und sonstige Bewegung des Elektrolyts.

(856) Zersetzungsspannung siehe (70) und (76). Die aufzuwendende elektrische Leistung ist gleich Stromstärke (I) mal Badspannung (E). Hierzu kommt die Überwindung der Leitungswiderstände. E setzt sich zusammen aus der Zersetzungsspannung ε und der zur Überwindung des Widerstandes R des Bades erforderlichen Spannung $e = I \cdot R$. Die Gesamtleistung ist daher $I \cdot E = I \cdot \varepsilon + I^2 \cdot R$. Bezeichnet man die wirklich erforderliche, gegenüber dem theoretischen Betrag stets höhere Leistung mit N, so ist die Energieausbeute oder der gewöhnlich in Prozenten ausgedrückte Wirkungsgrad $\eta = \frac{I \cdot E}{N}$. Die Messung von I und R ist die übliche [(177) bis (183) und (175)]. — ε kann mit genügender Genauigkeit bei kaltflüssiger Elektrolyse und unangreifbaren Elektroden durch rasche Ermittelung

der bei verschiedenen Stromstärken auftretenden Klemmenspannung bestimmt werden. Es ist $e = \varepsilon + i \cdot r$ und $e_1 = \varepsilon + i_1 \cdot r$, wobei r der Badwiderstand. ε ist dann $= \frac{e_1 \cdot i - e \cdot i_1}{i - i_1}$. Die für einen bestimmten Vorgang festliegende Zersetzungsspannung kann in manchen Fällen (Metallraffination) durch Depolarisation erniedrigt werden (lösliche Anoden, Verwendung reduzierender doer oxydierender Zusätze an Anode oder Kathode). Von Wichtigkeit für möglichste Erniedrigung der Badspannung sind: Nutzwiderstand, Widerstand von Kontakten und Elektroden, Konzentration, Zusammensetzung, Temperatur des Elektrolyts, Elektrodenabstand. — Mechanische Depolarisation (Entfernung von Gasblasen an den Elektroden, Vermeidung von Schichtenbildung) kann durch Rühren, Einblasen von Luft oder anderen Gasen, Kreislauf des Elektrolyts erfolgen. Bel letzterem ist auf Verluste durch Nebenschluß zu achten.

(857) Stromstärke. Die günstigste Stromstärke wird als Stromdichte in der Regel auf die Flächeneinheit der Elektroden bezogen und unter Berücksichtigung schon vorliegender Erfahrungen durch Vor- und Dauerversuche ermittelt. Mit zunehmender Stromdichte steigt die Erwärmung des Bades ($I^2 R$). — Dieser Umstand wird bei Schmelzflußelektrolysen in der Regel ausgenützt, während er bei Elektrolysen in wässeriger Lösung je nach dem Vorgang von Vorteil (Chloratdarstellung) oder von Nachteil (Persalze, Hypochlorit) sein kann. In letzterem Falle kann künstliche Kühlung erforderlich werden. Auch in bezug auf die elektrolytische Arbeit selbst besteht jeweils ein günstigstes Verhältnis zwischen Stromdichte und Stromausbeute. Letztere bezeichnet das Verhältnis zwischen theoretisch möglichen (Faradaysches Gesetz) und wirklich erhaltenen Mengen in der Regel auf die Amperestunde bezogen; vgl. (67) und Tabelle S. 54.

(858) Elektroden. Von Einfluß ist das Elektrodenmaterial bezüglich mechanischer Festigkeit, chemischem Angriff, Leitfähigkeit und „Überspannung" (kathodisch in verdünnter Schwefelsäure 0,005 bis 0,78 V je nach dem angewandten Metall). — Katalytische Wirkungen des Elektrodenmaterials können auftreten.

Das Material für die Elektroden hängt mit dem durchzuführenden Verfahren natürlich eng zusammen. Die am meisten verwendeten Elektrodenmaterialien sind die folgenden:

Verfahrengruppe	Anode	Kathode
A. Wässerige Elektrolyse:		
a) mit löslichen Anoden		
1. Metallraffination	das betreffende Rohmetall	das betreffende Feinmetall
2. Galvanoplastik u. Galvanostegie		
3. Herstellung unlösl. Metallverb.		
b) mit unlöslichen Anoden		
1. In alkalischer Lösung	Fe, Ni	Fe
2. In schwefelsaurer Lösung	Pt, Pb, PbO_2, MnO_2, Fe_3O_4	verschiedene Metalle
3. In Chloridlösung		
a) Hypochlorit	Pt, C	Pt, C
b) Chlorat u. Perchlorat	Pt	Fe, C
c) Chlor-Alkali	C, F_3O_4	Fe, Hg
B. Schmelzflußelektrolyse:		
1. Alkalimetalle aus Hydraten	Fe	Fe
2. Magnesium aus Chlorid	C	Fe
3. Aluminium aus Fluorid	C	C

Näheres siehe bei der Besprechung der einzelnen Arbeitsgebiete. Die Form der Elektroden paßt sich den Apparatformen an. Die Größe kann an beiden Polen gleich oder verschieden sein. Sie können im Apparat selbst parallel oder in Reihe geschaltet sein. Bei Anoden aus Edelmetall verwendet man zwecks Materialersparnis dünne Folien oder Netze aus dünnen Drähten. In manchen Fällen dienen die metallischen Behälter für das Elektrolyt direkt als Kathode. Bipolar geschaltete Elektroden können auch als Scheidewände für einzelne in Reihe geschaltete Apparatelemente dienen (z. B. filterpressenartiger Aufbau bei elektrolytischen Wasserzersetzern).

(859) Diaphragmen. Bei wässerigen Elektrolysen, bei welchen die Produkte an den beiden Polen getrennt gehalten werden müssen, verwendet man in manchen Fällen poröse Scheidewände, sogenannte Diaphragmen. Man kann hier unterscheiden:

a) Diaphragmen im eigentlichen Sinne, welche den Ionen den Durchgang gestatten, aber möglichst an den beiden Polen Lösungen von verschiedener Zusammensetzung getrennt halten sollen (z. B. Diaphragmenverfahren bei der Alkalielektrolyse).

b) Mechanisch wirkende, poröse Scheidewände, welche bei Lösungen gleicher Zusammensetzung an beiden Polen die Übertragung fester oder gasförmiger Körper von dem einen zum anderen Pol verhindern sollen (z. B. poröse Tücher bei Wasserzersetzern, poröse Platten bei der Herstellung von Elektrolyteisen behufs Abhaltung von Anodenschlamm von der Kathode usw.).

Andererseits kann man unterscheiden zwischen starren Diaphragmen (Tonplatten, Kieselgurplatten, Asbestpappe, Zementplatten, Seifenplatten usw.), Geweben (Asbest, Glaswolle usw.) und endlich plastischen Massen (z. B. Gemenge von Asbestfasern und Schwerspatpulver beim Chloralkaliverfahren Siemens-Billiter). Letztere müssen naturgemäß in horizontaler Lage verwendet werden.

(860) Als **Gefäße** verwendet man in der Regel für schwefelsaure Lösungen verbleite Holzgefäße, für Chloridelektrolyse zementierte Eisenwannen, aus Granit oder Schiefer zusammengesetzte Behälter, für Schmelzelektrolyse meistens mit Kohlenstampfmasse ausgekleidete Behälter, die z. B. bei der Aluminiumdarstellung gleichzeitig Kathode sind.

(861) Schaltung. Speist eine Stromquelle mehrere elektrolytische Zersetzungsapparate, so können diese parallel, in Serie oder gemischt geschaltet werden.

Askenasy, Einführung in die technische Elektrochemie, 1910. — Billiter, Die elektrochemischen Verfahren der chemischen Großindustrie. (Bisher erschienen Bd. I 1909, Bd. II 1911, Bd. III 1918.) — Danneel, Elektrochemie 1905 u. 1908. — Förster, Elektrochemie wässeriger Lösungen 1905. — Le Blanc, Lehrbuch der Elektrochemie 1911. — Lüpke-Bose, Grundzüge der Elektrochemie 1907. — Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. Halle a. S., Knapp. Bisher erschienen 45 Bände.

I. Elektrolytische Metallgewinnung.

(862) Allgemeines. Betrifft die Gewinnung reiner Metalle aus wässerigen oder geschmolzenen Elektrolyten, wobei man von natürlichen Erzen, künstlich hergestellten Metallverbindungen oder Rohmetallen ausgehen kann. In letzterem Falle spricht man von elektrolytischer „Raffination" und verwendet das Rohmetall als Anode. Als Elektrolyt kann ein Salz des zu gewinnenden oder eines elektropositiveren Metalls dienen (Schmelzflußelektrolyse). — In wässeriger Lösung (z. T. auch bei der Schmelzflußelektrolyse) können auch Säuren oder Alkalien als Elektrolyte dienen. Arbeitet man mit unlöslichen Anoden, so ist der Metallgehalt der Elektrolyte ständig, sei es durch Eintragen fester Verbindungen, sei es durch Elektrolytwechsel auf der erforderlichen Höhe zu halten. Bei löslichen Anoden muß man wegen der Aufnahme von Fremdmetallen, welche Badspannung und Qualität des Kathodenmetalles ungünstig beeinflussen können,

das Elektrolyt zeitweise erneuern. Fallweise können auch bei der elektrolytischen Metallgewinnung Diaphragmen Vorteile bieten.

Metallraffinationen erfordern eine um so geringere Badspannung, je reiner das Anodenmetall. — Depolarisatoren können die Spannung noch weiter heruntersetzen (z. B. SO_2), wodurch gleichzeitig ein Ersatz der durch Verunreinigung verbrauchten Säure (SO_3) erfolgen kann.

Die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Kathodenmetalles können durch besondere Maßnahmen, wie Entfernung von H-Bläschen, gute Bewegung des Elektrolyts, Umhüllung der Elektroden, richtige Auswahl von Zusammensetzung, Konzentration und Temperatur des Elektrolyts, Zusatz von Kolloiden gegen grobkristallinische Niederschläge günstig beeinflußt werden.

Bei der Schmelzflußelektrolyse bleibt meistens (nicht bei Al) die Konzentration des Elektrolyts praktisch gleich. — Doch auch hier können Verunreinigungen, Spritzverluste, Wiederoxydation von bereits gefälltem Metall und „Metallnebel" die Stromausbeute herabsetzen. Der Schmelzfluß wird in der Regel durch Joulesche Wärme (61) aufrecht erhalten, doch kann auch zusätzliche elektrische oder sonstige Heizung erforderlich werden.

Wässerige Elektrolyse stellt geringere Anforderungen hinsichtlich Material und Haltbarkeit als Schmelzflußelektrolyse. Erstere wird in der Regel für die Schwermetalle (Zn, Cu, Au, Ag, Sn, Ni, Fe usw.), letztere für die Leichtmetalle (Na, Ca, Mg, Al usw.) angewendet. — Die intermediäre Bildung von Amalgamen, wie sie ein Teil der Chlor-Alkali-Verfahren benutzt, ist für die praktische Gewinnung von Leichtmetallen nicht anwendbar.

Borchers, Elektrometallurgie 1913. — Neuburger, Handbuch der praktischen Elektrometallurgie 1907. — Peters, Elektrometallurgie und Galvanotechnik 1900. — Regelsberger, Elektrometallurgie 1910. — Winteler, Die Aluminiumindustrie 1903. — Siehe auch S. 595: Askenasy, Billiter; aus Engelhardts Monographien: Bd. 2, Minet, Aluminium; Bd. 35, Betts, Bleiraffination; Bd. 6, Borchers, Nickel; Bd. 9, Becker, Alkalimetalle; Bd. 10, Ulke, Kupfer; Bd. 16, Günther, Zink; Bd. 26, Neumann, Eisen; Bd. 39, Mennicke, Zinn; Bd. 3, Le Blanc, Chrom.

Leichtmetalle.

(863) Alkalimetalle (Na, K, Li, Rb, Cs). Es wird nur Natrium im größeren Maßstabe hergestellt. Je nach dem Elektrolyt unterscheidet man folgende Verfahrengruppen:

a) Elektrolyt geschmolzenes wasserfreies Ätznatron. Die verbreitetste Anwendungsform, Außenheizung oder durch Stromwärme. Hohe Stromdichten 150—250 A/dm². Temperatur wenig über Schmelzpunkt. Eisengefäße. Isolation durch erstarrte Schmelze. Anode Eisen oder Nickel, Kathode Eisen oder Kupfer. Geringer Karbonatgehalt günstig. Badeinheiten 100—2500 A. 4,5—5 V. Stromausbeute nicht über 50%. Wasserstoff verbrennt. Ausführungsformen: 1. Castner (DRP 58121) Abb. 487, *A* eisernes Schmelzgefäß, *H* Kathode, *F* Anode, *M* Drahtsiebzylinder, *C* Metallmantel mit Deckel *N*. Verbreitetste Ausführungsform, 2. Becker (DRP 104955), 3. Hulin (DRP 224853), 4. Rathenau & Suter (DRP 96672).

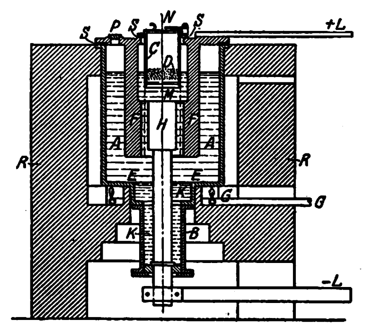


Abb. 487. Kastnerscher Ofen.

b) Elektrolyt geschmolzene Soda: Von Heyden-Oettel (DRP 269712).

c) Elektrolyt geschmolzenes Kochsalz: mit starrer Kathode Sodium Process Co (DRP 247444, 268727), Lonza (DRP 268280), Chem. Industrie Basel (DRP 236804). Die Verfahren, welche geschmolzenes Kochsalz mit geschmolzenen Bleikathoden zerlegen, kommen in erster Linie für Gewinnung von Ätznatron und nicht Natriummetall in Frage.

d) Elektrolyse geschmolzenen Salpeters: Darling (DRP 83097, 97166). Hat sich nicht bewährt.

Becker, Alkalimetalle in Engelhardts Monographien. Bd. 9, 1903. — Billiter, Die Elektrolyse feuerflüssiger Schmelzen. Halle a. S. 1918, Knapp.

Erdalkalimetalle.

(864) Kalzium, Strontium, Barium, Magnesium. Bisher nur Ca und Mg technisch dargestellt. Elektrolyt geschmolzenes, wasserfreies Chlorid. Die Darstellung von Kalzium führten Borchers & Stockem (DRP 144667) zuerst durch. Technische Zersetzungsapparate von Seward & Kügelgen (DRP 214963). Elektrolyt von derartigem spez. Gewicht, daß das Metall aufsteigt (Abb. 488) und in einem gekühlten Metallring *f* gesammelt wird. Anode *d*, Kathode *c*, eisernes kühlbares Gefäß *a*, wodurch Isolation durch erstarrte Schmelze. Suter & Redlich (Elektrochemische Werke Bitterfeld DRP 155433) verwenden Berührungskathoden, so daß das Kathodenmetall allmählich in erstarrtem Zustande aus dem Bade herausgezogen wird.

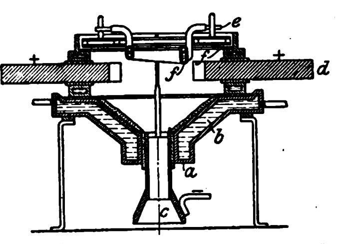


Abb. 488. Zersetzungsapparat von Seward u. Kügelgen.

Magnesium wird durch Elektrolyse von gereinigtem Carnallit dargestellt. Stromdichte 10 A/dm². 7 Volt. 60—80 % Stromausbeute. Reinheit des Metalls ca. 99 %. — Neuerer Zeit sind anscheinend ähnliche Verfahren wie bei Kalzium mit Berührungselektroden in Anwendung.

Billiter, Die Elektrolyse feuerflüssiger Schmelzen. Halle a. S. 1918, Knapp.

Erdmetalle.

(865) Aluminium. Die technische Gewinnung dieses Metalles durch Schmelzflußelektrolyse ist auf Arbeiten Héroults und insbesondere Kilianis zurückzuführen.

Zur Elektrolyse dient ein Bad aus natürlichem Kryolith oder aus Fluoraluminium und Fluornatrium, dem von Anfang an etwa 20 % reine wasserfreie Tonerde beigemengt und im Verlaufe des Verfahrens entsprechend dem Stromverbrauch und unter Aufrechterhaltung der Spannung von 5,5 bis 8 V (je nach der Kapazität des Ofens) regelmäßig zugesetzt wird. Da die Schmelze bei der Temperatur der Elektrolyse (900—1000°) ein spez. Gewicht von max. 2,35, das geschmolzene Aluminium etwa 2,54 hat, so sammelt sich letzteres auf dem Boden des Ofens an, von wo aus es von Zeit zu Zeit mit eisernen Löffeln herausgeschöpft oder abgestochen wird. Die Stromdichte beträgt etwa 2,5 A auf 1 dm² Badquerschnitt.

1 kg Aluminium bedarf zu seiner Ausscheidung theoretisch 2970 Ah, die wirkliche Ausbeute beträgt bei einem Ofen, der mit 7500 A arbeitet, in 24 Stunden 43,1 kg Aluminium, also 71 % der Theorie (auf den Stromverbrauch), der tatsächliche elektrische Energieverbrauch 22 bis 23 kWh für 1 kg Aluminium (bei 5,5 V). Andere Verluste bestehen in der Verdampfung der Fluorsalze der Schmelze, wobei das Fluor teils mit Natrium und Aluminium zusammen, teils in gasförmigen (Kohlenstoff-)Verbindungen weggeht, sowie auch dadurch, daß ein Teil des Alu-

miniums in Aluminiumkarbid übergeht, so daß die Schmelze von Zeit zu Zeit entfernt werden muß. Der Ofen ist ein mit zäher Kohlenpulverteermischung, die durch Ausbrennen erhärtet wird, ausgestampfter zylindrischer oder viereckiger Eisenblechkasten; im Boden sind starke eiserne Stifte, von einer eisernen Bodenplatte ausgehend, als Stromzuleiter mit eingestampft. Der Ofen (s. den schematischen Längsschnitt Abb. 489) dient somit als Kathode. Die Anoden — starke zylindrische Stangen oder vierkantige prismatische Blöcke, aus künstlicher Kohle gepreßt — müssen leicht verstellbar aufgehängt sein, und zwar derart, daß sie von der Wandung weiter entfernt sind als vom Boden. Der Verbrauch an Anodenkohlen beträgt etwa 1 kg auf 1 kg erzeugtes Aluminiummetall.

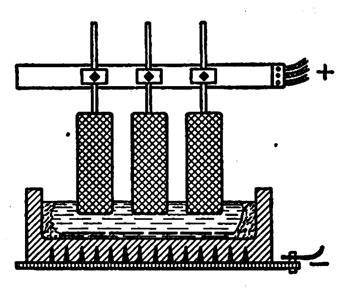


Abb. 489. Aluminiumofen.

Die Gestehungskosten des Aluminiums werden außer von der elektrischen Kraft durch den Preis der Elektrodenkohlen und der Tonerde bedingt, welche beide sehr rein, insbesondere frei von Eisen und Silizium sein müssen.

Winteler, Die Aluminium-Industrie 1903. — Minet, Aluminium 1902; aus „Monographien über angewandte Elektrochemie". — Richards, Aluminium 1896, 3. Aufl. 1896.

Die Gewinnung des Berylliums ähnelt der des Aluminiums.

Auch die Gewinnung der Ceritmetalle, die als „Mischmetall" Bedeutung für die zu Zündzwecken geeigneten pyrophoren Legierungen gewonnen haben, ist dem ähnlich (vgl. Liebigs Annalen der Chemie Bd. 320, 331 und 335).

Schwer- oder Erzmetalle.

(866) Zink, Kadmium, Quecksilber. Elektrolyse von direkt aus Erzen gewonnenen Zinksulfatlösungen hat während des Weltkrieges umfangreiche Einführung in den Vereinigten Staaten gefunden. Erfordert ganz reine Laugen. Gibt sehr reines Feinzink, welches derzeit noch zu Überpreisen gehandelt wird.

Betriebsspannung 3,5—4 V, Stromdichte 1 A/dm². Stromausbeute bei reinen Lösungen hoch.

Erwähnenswert sind für die Verarbeitung von Zinklaugen die neueren Vorschläge von Siemens & Halske, die als Anoden solche aus dichtem Bleisuperoxyd oder Mangansuperoxyd vorschlugen, von Laczcynski, der die Anoden mit einem Gewebe umhüllt, von Tossizza (Am. Pat. 703857) und von Rontschewsky (Zeitschr. f. Elektrochemie Bd. 7, S. 21), die unter Anwendung von Diaphragmen an der Anode chemische Arbeit leisten lassen und so den Spannungsverbrauch erniedrigen.

Die Elektrolyse von Kadmium- und Quecksilberlösungen (Alkalisulfidlösung) hat bisher keine technische Anwendung gefunden.

Günther, Die Darstellung des Zinks. Bd. 16 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.

(867) Kupfer. In die Kupferhüttentechnik hat die Elektrolyse nach Erfindung der Dynamomaschine in ausgedehntestem Maßstabe Eingang gefunden, und zwar zunächst zur Raffination von Schwarz- und Garkupfer. Seitdem wird weit über die Hälfte des Weltverbrauchs an Reinkupfer durch elektrolytische Raffination gewonnen. Die Rohkupferanoden werden abwechselnd mit Feinkupferblech-Kathoden in hölzerne mit Blei ausgekleidete Bottiche gehängt. Die Entfernung zwischen den Elektroden beträgt 50 bis 80 mm. Zur Verbindung der Elektroden mit den Leitungen dienen Kupferstreifen, welche auf den Längsleisten eines auf dem Bottichrande ruhenden, mit Öl, Paraffin oder ähnlichen Substanzen-

getränkten Holzrahmens liegen (Parallelschaltung). Die Anoden haben je zwei Ansätze, mit denen sie auf die Leitungen gehängt werden. Je einer dieser Ansätze ist gegen die negative Leitung durch Anstrich oder Gummiplatten isoliert. Die Kathoden hängen meist in Kupferhaken an Holzleisten. Zur Verbindung ist ein Kupferblechstreifen so über die Holzleiste gezogen, daß er mit einem oder beiden Haken und der negativen Leitung in Berührung steht. Das Elektrolyt besteht aus einer mäßig konzentrierten, sauer zu haltenden Kupfervitriollösung. Durch Einblasen eines feinen Luftstromes in ein oben und unten offenes Rohr, das die Mitte des Bodens mit einem Ende des Flüssigkeitsspiegels im Elektrolysierbottiche verbindet, erreicht man eine ideale Laugenzirkulation neben Reinerhaltung der Laugen, wenn man die Bäder mäßig warm hält. Bei Kupfersorten, welche ohne diese Laugenzirkulation höchstens mit einer Stromdichte von 30 A/m^2 verarbeitet werden konnten, kann man heute bis auf 100 A/m^2 gehen, bei reineren Kupfersorten steigert man die Stromdichte auf 150 bis 200 A/m^2. Die erforderliche EMK beträgt für die Zelle je nach der Reinheit des Kupfers und des Elektrolyts 0,1 bis 0,25 V. Außer der vorstehend geschilderten Schaltung ist in Nordamerika auch die Reihenschaltung mit gutem Erfolg in Gebrauch, wobei in jedem Bade zwischen der stromzu- und abführenden Platte ohne metallische Verbindung eine Anzahl Kupferplatten als Mittelleiter hängen; sie verlangt jedoch schon sehr gutes (99,5 %) Anodenkupfer.

Das Kupfer geht von der Anode zur Kathode über; einige Verunreinigungen des Rohkupfers (Fe, Ni, Co, As usw.) gehen in Lösung, ohne an der Kathode gefällt zu werden. Ag, Au, PbO_2, Cu_2O (auch fein pulver. metall. Cu) treten nicht in die Lösung ein, sondern fallen als „Anodenschlamm" ab. Dieser wird gesammelt und mit Blei abgetrieben.

Durch Aufnahme dieser Verunreinigungen aus der Anode verarmt das Bad gleichzeitig an Kupfer und an Säure, so daß für Zufuhr beider gesorgt werden muß.

Die direkte Verarbeitung roher sulfidischer Kupfererze in elektrolytischen Kreislaufprozessen (Siemens & Halske mit Ferrisulfat, Höppner mit Kupferchlorid) hat sich keinen Eingang in die Industrie verschaffen können. — Hingegen kommt die chemische Laugung mit Schwefelsäure und Elektrolyse der Sulfatlösungen bei natürlichen oxydischen oder gerösteten sulfidischen Erzen immer mehr zur Aufnahme, insbesondere in Amerika.

Zu erwähnen ist hier auch das Elmoresche Verfahren, nach welchem (z. B. in Schladern a. d. Sieg) nahtlose Kupferröhren unter Verwendung eines Rohkupfers von 94—96 % Feingehalt auf galvanoplastischem Wege mittels drehender und von hin- und hergehenden Glättwerkzeugen bearbeiteter walzenförmiger Kathoden hergestellt werden (Stromdichte 600 A/m^2); als Elektrolyt dient schwachsaure Kupferlösung; Au und Ag sammeln sich im Schlamm.

Ulke, Die elektrolyt. Raffination des Kupfers. 1904 (Bd. 10 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

(868) Silber. Bei der Raffination gold- und platinhaltigen Silbers wird dieses an der Anode gelöst und an der Kathode niedergeschlagen. Elektrolyt: verdünnte, sauer gehaltene Lösung von $Ag\,NO_3$.

Bei Feinsilberarbeit sind die Anoden Blicksilberplatten, die an Haken auf einem auf den Leitungen ruhenden und mit der positiven Leitung in Kontakt befindlichen Bronzerahmen hängen, die Kathoden Feinsilberbleche, die mit Hilfe von Stäben und Haken ebenfalls auf die Leitungen gehängt und hierdurch mit dem negativen Pol in leitender Verbindung sind. Die Anoden sind mit Leinenbeuteln umgeben. Man arbeitet mit verhältnismäßig hohen Stromdichten (bis zu 300 A/m^2 Kathodenfläche), um die wertvollen Metalle schnell durchzusetzen. Das Silber wächst daher in Nadeln an den Kathoden an und wird fortwährend durch hölzerne, mechanisch bewegte Abstreicher abgestoßen; es sammelt sich in einem mit Leinwand ausgelegten und mit Lattenboden versehenen Kasten, der am Boden des Elektrolysierbottichs steht. Alle 24 h wird das abgestoßene Silber herausgehoben, ge-

waschen, gepreßt, getrocknet und eingeschmolzen. Die Anodenbeutel werden wöchentlich ein- oder zweimal von dem Goldschlamm entleert, der dann in bekannter Weise weiter verarbeitet wird. Bei 4 Elektrodenpaaren im Kasten beträgt die erforderliche Spannung 1,5 V. Dieses von Moebius ausgearbeitete Verfahren ist in Deutschland in der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt vorm. Rößler & Co. in Frankfurt a. M. in Betrieb.

(869) Gold. Die elektrolytische Ausfällung aus den verdünnten Cyankaliumlaugen nach Siemens & Halske ist zwar von gutem Erfolg, wird aber durch die chemische Fällung mittels Aluminium oder Zink stark verdrängt. Als Anoden dienen Eisenbleche, als Kathoden Bleibleche. An der Anode bilden sich verwertbare Eisencyanide (Berlinerblau), die mit Gold belegte Bleiplatte wird von Zeit zu Zeit eingeschmolzen und das Gold daraus abgetrieben.

Nach Wohlwill (Verfahren der Norddeutschen Affinerie) wird Rohgold als Anode gegenüber einer Feingoldkathode in verdünnter warmer Salzsäure bzw. saurer Goldchloridlösung bei hoher Stromdichte (1000 A/m² und darüber), besonders vorteilhaft mit asymmetrischem Wechselstrom (DRP. 207555), elektrolysiert, wobei ein sehr reines Gold entsteht, während Platin und Palladium in Lösung, Iridium und Silber (als Chlorsilber) in den Schlamm gehen. Das im Bad gelöste Platin muß von Zeit zu Zeit durch Ausfällen mit Salmiak entfernt werden.

(870) Zinn. Zinnerze werden elektrolytisch nicht verarbeitet. Die elektrolytische Verarbeitung von Weißblechabfällen (als Anode) in alkalischer Lösung wurde früher an mehreren Stellen betrieben, wird aber in neuerer Zeit immer mehr durch rein chemische Verfahren verdrängt (Chlorierung).

Es wurde mit warmen 10 %igen NaOH-Lösungen (2 % Sn) und 1,5 V Betriebsspannung gearbeitet.

Mennicke, Die Elektrometallurgie des Zinns (Bd. 39 aus Engelhardts' Monographien über angewandte Elektrochemie).

(871) Blei. Die Schwierigkeiten, die die Gewinnung von reinem, dichtem Blei aus Rohblei durch Elektrolyse der wässerigen Lösung seiner Salze bot, sind überwunden, seitdem man nach Betts (DRP. 198288) als Elektrolyt die Kieselflußsäure unter Zusatz von Gelatine benutzt. Dabei scheidet sich der nicht unbedeutende Wismutgehalt des Rohmetalls nebst anderen Fremd-(auch Edel-)metallen gänzlich im Anodenschlamm ab; auch die Verwendung der Überchlorsäure hat bei gleichzeitigem Zusatz von Kalloidsubstanzen gutes Walzblei ergeben.

Betts, deutsch von Engelhardt, Bleiraffination durch Elektrolyse. 1910. (Bd. 35 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

(872) Nickel, Kobalt. Nickel läßt sich bei höherer Temperatur aus Rohnickelanoden mit Nickellösungen gut raffinieren. Um Nickelerze zu verarbeiten, werden zunächst durch Röst- und Konzentrationsarbeit Legierungen mit Kupfer hergestellt, die dann elektrolytisch bis auf 1 % von Kupfer befreit werden, während der Rest an Kupfer und Eisen chemisch ausgefällt und die Nickellösung sodann elektrolysiert wird.

Borchers, Elektrometallurgie des Nickels. 1903. (Bd. 6 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

(873) Eisen. Elektrolytische Verfahren zur Gewinnung reinen Eisens sind von Fischer mit den Langbein-Pfanhauser-Werken in Leipzig, in neuerer Zeit auch von Schlötter, Oettinger, Estelle u. a. ausgearbeitet worden. Die erstgenannten arbeiten mit heißen Chlorürlösungen unter Zusatz von Erdalkali- oder Alkalichloriden. — Während des Krieges wurden von Siemens & Halske und Griesheim-Elektron große Anlagen in München und Bitterfeld für Rechnung des Reiches gebaut, um Elektrolyteisen an

Stelle von Kupfer für militärische Zwecke zu verwenden. Für Friedenszwecke sind die Gestehungskosten vorläufig noch zu hoch.

Neumann, Elektrometallurgie des Eisens. 1907. (Bd. 26 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

Die elektrolytische Gewinnung von Chrom, Mangan, Titan, Vanadium, Molybdän, Uran und anderer seltenerer Metalle ist zwar möglich, wird aber im technischen Maßstabe nicht durchgeführt.

II. Anwendung der Elektrolyse zur Herstellung chemischer Produkte.

Herstellung chemischer Produkte.

(874) Allgemeines. Die Herstellung chemischer Produkte durch Elektrolyse kann in verschiedenster Richtung, mit und ohne chemische Mitwirkung des Elektrodenmaterials erfolgen. Nachstehend einige Beispiele:

1. Gewinnung von Gasen an beiden Polen (z. B. elektrolytische Wasserzersetzung O + H —).
2. Gewinnung eines Gases an einem, einer gelöst bleibenden Verbindung am anderen Pol (z. B. Chlor-Alkali-Elektrolyse Cl + NaOH —).
3. Gewinnung löslicher Verbindungen an beiden Polen, die sich im Elektrolyseur wieder vereinigen unter Bildung
   a) gelöst bleibender Verbindungen (z. B. Hypochlorite bei dem Bleichelektrolyseuren),
   b) ausfallender unlöslicher Verbindungen (z. B. Oxyde, Sulfide, Superoxyde, Hydrate usw.).
4. Reine Oxydationsprozesse
   a) anorganische (z. B. Chlorat, Perchlorat, Persulfat, Permanganat usw.),
   b) organische.
5. Reine Reduktionsprozesse
   a) anorganische (z. B. Hydrosulfite),
   b) organische.

Löb, Die Elektrochemie der organischen Verbindungen. 1905. — Moser, Die elektrolytischen Prozesse der organischen Chemie (Bd. 36 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie). 1910. — Peters, Angewandte Elektrochemie. Bd. II (2 Abt.). Anorganische Elektrochemie Bd. III. Organische Elektrochemie und die bei den folgenden Einzelfällen angegebene Spezialliteratur.

Elemente und anorganische Verbindungen.

(875) Sauerstoff und Wasserstoff. Der Wasserstoff wird in der elektrolytischen Alkaliindustrie als Nebenprodukt gewonnen oder neben Sauerstoff durch Elektrolyse von Wasser, das mit Alkali oder Säure leitend gemacht worden ist, hergestellt. Er kommt, wie Sauerstoff, in Stahlflaschen komprimiert in den Handel.

Apparate zur gleichzeitigen Entwicklung von Sauerstoff und Wasserstoff sind zahlreich konstruiert worden, z. B. von Latschinoff, O. Schmidt, Garuti, Schoop, der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.; sie alle fußen auf der Elektrolyse von Natronlauge zwischen Eisen- oder Nickelelektroden oder von verdünnter Schwefelsäure zwischen Eisen- und Bleielektroden. Die Gase werden gesondert aufgefangen. Mit den Apparaten der Elektrizitäts-A.-G. vorm. Schuckert & Co. lassen sich in 24 Stunden 103 m^3 Sauerstoff und 212 m^3 Wasserstoff mit ca. 70 kW in 40 Zersetzungszellen zu 600 A und 2,8—3 V (bei 70° C) erzeugen.

Schoop, Die industrielle Elektrolyse des Wassers. Stuttgart 1901, und Engelhardt, Elektrolyse des Wassers. Halle 1902 (Bd. 1 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).



(876) Überführung des Chromoxyds in Chromsäure. Es handelt sich im wesentlichen um die Regenerierung der Abfallaugen der Alizarinfabriken. Aus diesen soll die in Chromalaun oder Chromsulfat übergegangene Chromsäure wieder zurückgebildet werden. — Das Verfahren ist technisch durchgebildet und wirtschaftlich durchführbar, wenn die zu regenerierenden Laugen keinen zu hohen Gehalt an organischen Substanzen haben und für deren vorausgehende Oxydation nicht zu hohe Energiemengen erfordern. Stromdichte bis zu 6 A/dm² bei 3—3,5 V Betriebsspannung.

Le Blanc, Die Darstellung des Chroms und seiner Verbindungen auf elektrischem Wege. 1902. (Bd. 3 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

(877) Alkalipermanganat. Nach einem Verfahren der Chemischen Fabrik auf Aktien (vorm. Schering) in Berlin wird durch Einleiten des Stromes in zwei getrennte Zellen mit poröser Scheidewand, die eine mit Alkalilösung und der negativen Elektrode, die andere mit Manganatlösung und der positiven Elektrode beschickt, an der letzteren das Permanganat, an der negativen Elektrode neben Alkali Wasserstoff erhalten.

(878) Perkarbonat. Wird eine gesättigte, durch Diaphragma in Anoden- und Kathodenraum getrennte Lösung von Kaliumkarbonat bei etwa —15° zwischen Platinelektroden mit hoher Stromdichte elektrolysiert, so erhält man im Anodenraum Kaliumperkarbonat neben Karbonat und Bikarbonat.

Die Perkarbonate finden in der Photographie Verwendung oder zur Herstellung von Wasserstoffsuperoxyd.

(879) Persulfosäure und deren Salze. Bei der Elektrolyse von Schwefelsäure, bzw. Alkalisulfaten mit hohen Stromdichten und niederen Temperaturen erhält man Überschwefelsäure und deren Salze. — Anode Platin, Kathode meistens Blei. — Technisch werden die Persulfate des Ammoniums, Kaliums und Natriums hergestellt. — Sie sind starke Oxydationsmittel.

(880) Elektrolyse der Alkalichloride. Je nach den Arbeitsbedingungen kann man bei der elektrolytischen Zerlegung der Alkalichloride (bzw. Bromide und Jodide) zu ganz verschiedenen Produkten kommen.— Man kann die nachstehenden Arbeitsgruppen unterscheiden:

a) Die Produkte der Elektrolyse, Halogen und Alkali werden durch Diaphragmen oder durch andere Maßnahmen getrennt gehalten: Darstellung von Chlor und Alkali.

b) Die Produkte vereinigen sich im Apparat selbst wieder und werden daher nicht getrennt. Elektrolyse erfolgt bei Zimmertemperatur: Darstellung von Hypochlorit (Bleichflüssigkeit).

c) Wie bei b, die Elektrolyse erfolgt aber bei höherer Temperatur: Darstellung von Chlorat.

d) Schon fertig vorliegendes, auf rein chemischem oder elektrolytischem Wege erhaltenes Chlorat wird bei sehr niederer Temperatur der Elektrolyse unterworfen: Darstellung von Perchlorat.

a) Chlor und Alkali. Die Elektrolyse wird in gesättigten Chloridlösungen von höherer Temperatur (ca. 60—70°) durchgeführt. Betriebsspannung 3,5—4 V. Die meisten Verfahren verwenden verhältnismäßig große Einheiten von 2000 bis 6000 A und darüber. Die Größe der Einheiten wird in der Regel danach gewählt, wie viel Bäder man bei einer bestimmten Produktion einrichten muß, um durch Serienschaltung auf normale Betriebsspannungen an den Dynamos zu kommen. In letzterer Beziehung geht man in der Regel nicht über 220 V hinaus. Anoden meistens graphitierte Kohlen, zum Teil auch Magnetit. — Kathoden meistens Eisen.

Je nach der Arbeitsweise lassen sich verschiedene Verfahrengruppen unterscheiden, die in den nachfolgenden schematischen Skizzen dargestellt sind:

I. Diaphragmenverfahren. Anoden- und Kathodenraum sind durch Diaphragmen voneinander getrennt. Man erhält daher im Anodenraum Chlorgas, im Kathodenraum eine Ätzkalkali enthaltende Chloridlösung, die außerhalb des Bades eingedampft wird. Das Chlorid fällt aus und geht in den Betrieb zurück, während die alkalische Dicklauge entweder als solche verwendet oder durch weiteres Eindampfen und Schmelzen auf festes Alkali verarbeitet wird. — Die Diaphragmenverfahren lassen sich in zwei Gruppen unterscheiden:

a) Verwendung von starren porösen, meist senkrecht angeordneten Diaphragmen. — Das bekannteste und verbreitetste Verfahren ist das von Griesheim-Elektron (Abb. 490). — Die Diaphragmen werden aus Zement unter Zusatz von Salz geformt und letzteres nach dem Binden ausgelaugt.

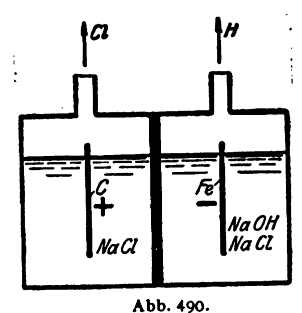


Abb. 490.
Altes Diaphragmaverfahren
(festes stehendes Diaphragma).

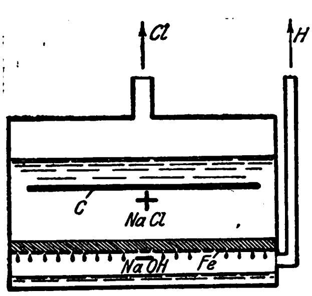


Abb. 491. Filter-Diaphragma
(pulverig-faserig).

b) Verwendung loser, aus faserigem und pulverigem Material gemengter horizontaler Diaphragmen. — Das verbreitetste Verfahren ist das von Siemens-Billiter. Als Diaphragma dient ein Gemenge von Schwerspat und Faserasbest. Das ganze Elektrolyt wird vom Anodenraum durch das Diaphragma gedrückt, welches auf einem als Kathode geschalteten eisernen Drahtnetz aufliegt. Das Katolyt tritt also nur tropfenweise in den Kathodenraum. Dieser ist also nicht mit Flüssigkeit gefüllt (Abb. 491).

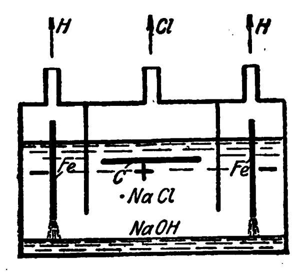


Abb. 492. Schichtungsverfahren.

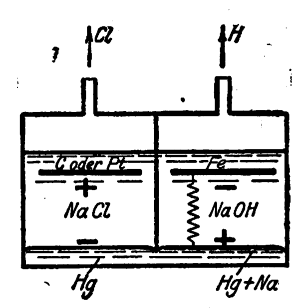


Abb. 493. Quecksilberverfahren.

II. Schichtungsverfahren. Das Elektrolysiergefäß enthält nur in seinem oberen Teile durch nichtleitende starre Wände geteilte Elektrodenräume. Das Katolyt sammelt sich infolge seines höheren spezifischen Gewichtes am Boden des Zersetzers. — Das bekannteste Verfahren ist das sog. „Außiger Glockenverfahren“ (Abb. 492).

III. Quecksilberverfahren. Diese verwenden eine Quecksilberschicht als Mittelleiter, so daß primär Chlorgas und Alkaliamalgam gebildet wird, welch letzteres als Anode gegen eine Eisenkathode wirkt und seinen Gehalt an Alkalimetall als Hydrat abgibt. Die Ätznatronlösung ist daher bei diesen Verfahren chloridfrei (Abb. 493). Die bekanntesten Verfahren dieser Gruppe sind die von Castner, Kellner-Solvay und Wildermann.

Lucion, Elektrolytische Alkalichloridzerlegung mit flüssigen Metallkathoden (Bd. 23 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie). — Billiter, Die elektrolytische Alkalichloridzerlegung mit starren Metallkathoden. I. u. II. Teil. (Bd. 41 u. 43 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie). — Schlötter, Über die elektrolytische Gewinnung von Brom und Jod. Bd. 27 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

b) Hypochlorit. Trennt man die bei der Elektrolyse der Halogenide entstehenden Produkte im Elektrolyseur nicht, sondern läßt man sie wieder aufeinander einwirken, so entstehen bei gewöhnlicher Temperatur in der Hauptsache Halogenite neben etwas Halogenat. — Das wichtigste bezügliche Verfahren ist die Herstellung von Hypochlorit, welches zum Bleichen in der Textil-, Papier- und Zellstoffindustrie und in neuerer Zeit auch zur Desinfektion von Trinkwasser an Stelle von Chlorkalk oder komprimiertem Chlor verwendet wird. Man verwendet heute wohl ausnahmslos Apparate mit doppelpolig wirkenden Elektroden, so daß der Anschluß an normale Gleichstromspannungen von 110 bzw. 120 V möglich ist.

Je nach dem verwendeten Elektrodenmaterial unterscheidet man:

1. Reine Platinapparate (Kellner-Siemens & Halske).
2. Reine Kohlenapparate (Haas & Stahl, Siemens & Halske).
3. Gemischte Platin-Kohlenapparate (Schuckert-Siemens & Halske).

Die Leistung der Apparate richtet sich, da die Stromausbeute mit der Konzentration an Bleichchlor abnimmt, nach letzterer; so weisen z. B. die Apparate von Siemens & Halske bei 15—20 g Bleichchlor im Liter und 10 proz. Salzlösung auf 1 kg Bleichlor einen Energieverbrauch von 5,7—5,9 kWh und 6,0—7,5 kg Salzverbrauch, dagegen für 30 g Bleichchlor im Liter auf 1 kg Bleichchlor einen Energieverbrauch von 6,5 kWh und 5,0 kg Salzverbrauch bei Anwendung einer 15 proz. Salzlösung auf.

Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. Bd. 8: Engelhardt, Hypochlorite u. elektrische Bleiche, technisch-konstruktiver Teil. 1903. Bd. 17: Abel, desgl., theoretischer Teil. Bd. 38: Ebert u. Nußbaum, desgl., prakt. angewandter Teil.

c) Chlorat. Arbeitet man wie unter b) aber bei höherer Temperatur, so tritt die Bildung von Hypohalogenit zurück und wird die Halogenatbildung zum Hauptprozeß. — Man verwendet in der Regel Platinanoden und Eisen- oder Kohlenkathoden bei sehr hoher Stromdichte, um die erforderliche höhere Temperatur durch Stromwärme zu erreichen. — Am verbreitetsten ist die Darstellung von chlorsaurem Kali. — Da dieses in der Kälte schwer löslich ist, so wird es aus den elektrolysierten Chloridlösungen durch einfaches Abkühlen erhalten, während die Mutterlaugen wieder in den Betrieb zurückkehren.

Kerschaw, Die elektrolytische Chloratindustrie (Bd. 19 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

d) Perchlorat. Wird schon vorliegendes Chlorat bei tiefer Temperatur der Elektrolyse unterworfen, so erhält man Perchlorat. Anode in der Regel Platin, Kathode Eisen.

(881) Elektrolytische Darstellung unlöslicher anorganischer Verbindungen. Durch Verwendung von Metallanoden und Alkalisalzelektrolyten ohne Diaphragma lassen sich eine Reihe von Oxyden und Hydroxyden darstellen. Auf ähnliche Weise lassen sich elektrolytisch Bleiweiß, Bleisuperoxyd, Chromgelb, Schwefelkadmium, Zinnober und andere Verbindungen darstellen.



Organische Verbindungen.

Die Elektrolyse hat bis jetzt für die organische Chemie hauptsächlich wissenschaftliches Interesse. Die Anwendung in der Praxis ist sehr beschränkt, da die einfachen chemischen Reaktionen meist billiger und glatter verlaufen als die mit unerwünschten Nebenwirkungen verknüpften, im Energiebedarf teuren elektrochemischen Reaktionen.

(882) Jodoform. Die chemische Fabrik auf Aktien in Berlin vorm. E. Schering hat ein Verfahren zur elektrolytischen Darstellung von Chloroform, Jodoform und Bromoform patentiert erhalten. Die Darstellung des Jodoforms geschieht durch Einwirkung des Stromes auf eine an der Anode mit Alkohol versetzte Lösung von Soda und Jodkalium; das Jodoform entsteht an der Anode.

Moser, Die elektrolytischen Prozesse der organischen Chemie (Bd. 36 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

III. Weitere Anwendungen der Elektrolyse.

(883) Elektrolytische Verfahren zum Färben, Bleichen, Reinigen usw. Im Vorstehenden wurden Verfahren angeführt, bei welchen durch Elektrolyse ganz bestimmte, wohl definierte Stoffe gewonnen werden sollen. Es wurde nun auch versucht, durch Strom eine Reihe elektrolytischer Wirkungen zu erzielen, die keine so einfachen und leicht definierbare Vorgänge darstellen, sondern bei welchen eine ganze Reihe von Reaktionen nebeneinander auftritt und nur ein bestimmter Enderfolg in bezug auf Veränderung des Rohmaterials angestrebt wird. — Es handelt sich hierbei meistens um Reinigungs- oder Konservierungsverfahren, welche aber zum großen Teil nicht über das Versuchsstadium hinausgekommen sind. Einige der wichtigsten Verfahrengruppen seien nachstehend angeführt:

1. Färbungen auf der Faser.
2. Direkte Bleichverfahren, bei welchen im Gegensatz zur gesonderten Darstellung des Bleichmittels das Bleichgut direkt in den elektrolytischen Zersetzer gebracht wird.
3. Direktes Aufschließen von Holz zu Zellstoff, Konservierung von Holz.
4. Entfetten und Entschweißen von Wolle.
5. Elektrolytisches Gerben.
6. Elektrolytische Reinigung von Trink- und Abwasser.
7. Verhinderung von Kesselsteinbildung.
8. Reinigung zuckerhaltiger Flüssigkeiten (Rübensaft, Rohrzuckersaft, Melasse).
9. Reinigung von Alkohol, Wein, Essig.
10. Reinigung von Ölen und Fetten usw.

IV. Elektrothermisch-chemische Vorgänge und Einrichtungen hierzu.

Allgemeines.

(884) Die **elektrothermische Wirkung** des elektrischen Stromes entsteht durch den Leitungswiderstand der von ihm durchflossenen Körper und wird, außer bei der schmelzflüssigen Elektrolyse behufs Aufrechterhaltung des Schmelzflusses, benutzt, wenn es sich, auch ohne gleichzeitige Elektrolyse, um die Erzeugung sehr hoher Temperaturen behufs Ausführung von chemischen Umsetzungen und Zersetzungen handelt, die sich sonst nur schwer durchführen lassen. Sie unterliegt dem Jouleschen Gesetze und ist (61)

$$Q = 0{,}239 \cdot I^2 R t.$$



(885) Erhitzungsarten. Man unterscheidet verschiedene Erhitzungsarten, je nachdem der Heizstrom das Material selbst als Widerstand durchströmt (direkte Heizung) oder einen benachbarten Widerstand z. B. die Ofen- oder Tiegelwandung, oder auch einen frei im Ofenraum angeordneten Widerstand, durchfließt, in welch letzteren Fällen die erzeugte Wärme durch Leitung oder Strahlung auf das zu erhitzende Gut übertragen wird (indirekte Heizung). In beiden Fällen kann man noch unterscheiden a) reine Widerstandsheizung, und zwar durch primären Strom, b) Erhitzung durch Sekundärstrom (Induktionsheizung) und c) Lichtbogenheizung, bei der im Falle der direkten Erhitzung das Material selbst einen Pol des Lichtbogens bildet oder auch — bei Gasen — vom Lichtbogen durchzogen wird. Man benutzt übrigens auch elektrisch erhitzte Gase sowie verschiedene Erhitzungsarten neben- oder nacheinander (kombinierte Heizung). Bei der direkten Heizung muß das Material den erforderlichen Widerstand bieten; dieser läßt sich häufig — bei an sich schlecht leitenden Massen — durch Zumischung besser leitender Stoffe, die den Prozeß nicht stören oder sogar, wie bei metallurgischen Reduktionsprozessen, Kohle oder Silizium u. a., im Prozeß erforderlich sind, regeln. Ist dies nicht angängig, wie z. B. bei der Raffination von Stahl, so kann man häufig durch Querschnittsverengerungen des Metallbades, etwa rinnenartige Anordnungen, zum Ziele gelangen.

Bei der Induktionsheizung ist es ein transformierter Strom, der durch den Heizwiderstand geht. Sein primärer Strom hat hohe Spannung und entsprechend geringe Stärke; die Transformierung wie die Gesamtenergie muß unter Abrechnung der Transformierungsverluste durch Selbstinduktion und Streuung dem gegebenen Widerstand entsprechen.

Während für die Schmelzelektrolyse das Bad selbst als Erhitzungswiderstand dient, verwendet man in Fällen, wo das Erhitzungsgut den Strom nicht leitet oder dadurch nachteilig beeinfußt würde, die Erhitzung durch Wärmeleitung oder -strahlung. Für die Heizung eignet sich jede Stromart, doch nimmt man meist mehrphasigen Wechselstrom.

Elektrische Öfen.

(886) Arten der Öfen. Die elektrischen Öfen lassen sich systematisch in folgende Gruppen teilen:

A. Lichtbogenöfen.

I. Indirekte Lichtbogenöfen (Strahlungsöfen). — Der Einsatz wird nur durch die strahlende Wärme des Lichtbogens geheizt, welcher also nicht zum Einsatz überspringt. Bekannteste Systeme: Stassano (Abb. 493), de Laval, Bonner Maschinenfabrik, Rennerfeldt. Hauptsächlich in der Metallindustrie verwendet (Elektrostahl, Zinkdestillation, Schmelzen von Schwermetallen und Legierungen).

II. Direkte Lichtbogenöfen. Der Lichtbogen springt zu dem Einsatz direkt über.

a) Die Heizung erfolgt nur durch den Lichtbogen, der von allen Elektroden zum Einsatz überspringt. Bekannteste Systeme: Héroult (Abb. 494), ältere Keller-Öfen. — Hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwendet.

b) Ein in der Regel metallischer Pol liegt im Ofenboden und ist direkt mit dem Einsatz in leitender Verbindung. Bekannteste Systeme: Girod (Abb. 496), neuerer Keller-Ofen. Hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwendet.

c) Die Heizung erfolgt durch zwei Stromkreise, einerseits durch direkte Lichtbogenheizung wie Abb. 495, anderseits durch Widerstandsheizung mit



Bodenpolen, die mit Stampfmasse überdeckt sind. Diese wirkt bei höherer Temperatur als Leiter zweiter Klasse. — Bekannteste Systeme: Nathusius (Abb. 497), Gesellschaft für Elektrostahlanlagen. Hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwendet.

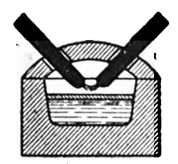


Abb. 494. Nach Stassano. indirekt

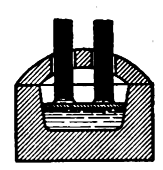


Abb. 495. Nach Héroult, direkt

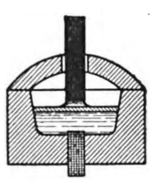


Abb. 496. Nach Girod, direkt

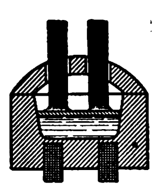
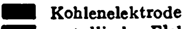


Abb. 497. Nach Nathusius, direkt



Kohlenelektrode
metallische Elektrode
feuerfester Körper
flüssige Schlacke
körniges Schmelzgut

Abb. 494 bis 497, Öfen mit Lichtbogenheizung.

B. Direkte Widerstandsöfen.

I. Kanalöfen (Abb. 498). Herd in horizontaler, langgestreckter Form und Anschluß des Einsatzes an die Stromquelle durch entsprechende Kontaktkörper. Sowohl für flüssige als feste Leiter verwendet. Bekannteste Systeme: Taussig,

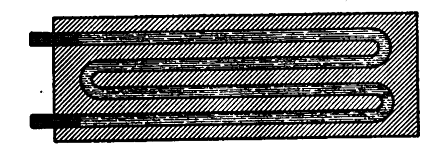
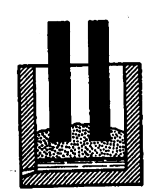


Abb. 498. Kanalofen. (Erklärung zur Darstellung s. bei Abb. 494.)



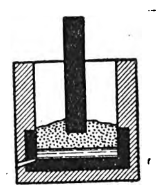


Abb. 499 und 500. Schacht- und Tiegelöfen. (Erklärung zur Darstellung s. bei Abb. 494.)

deLaval, Gin, Acheson. Derartige Öfen werden heute hauptsächlich bei der Herstellung des künstlichen Graphits und des Karborundums verwendet.

II. Schacht- bzw. Tiegelöfen (Abb. 499/500). In der Hauptsache vertikale Ausbildung des Ofens.

a) Ofenwand nicht leitend, also alle Pole getrennt vom Ofenschacht. Bekannteste Systeme: Grönwall, Helfenstein. Hauptsächlich bei der Herstellung von Elektroroheisen und der elektrothermischen Zinkgewinnung verwendet.
b) Teile der Ofenwand als ein Pol. Bekannteste Systeme: Héroult, Keller, Lorentzen. — Werden verwendet zur Herstellung von Elektroroheisen, Ferrolegierungen, Karbiden, Siliziden usw.

C. Indirekte Widerstandsöfen. (Induktionsöfen.)

I. Einrinnenofen mit röhrenförmiger Primärspule (Schmelzrinne) System Kjellin (Abb. 501).
II. Einrinnenofen mit scheibenförmiger Primärspule System Frick (Abb. 502).
III. Mehrrinnenofen mit zentralem Arbeitsherd System Röchling-Rodenhauser (Abb. 503).

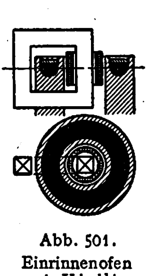


Abb. 501. Einrinnenofen nach Kjellin.

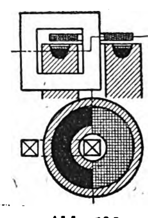


Abb. 502. Einrinnenofen nach Frick.

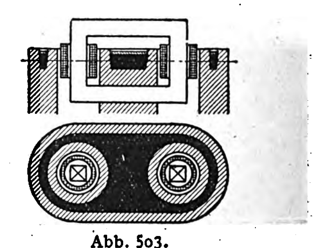


Abb. 503. Mehrrinnen-Induktionsofen nach Röchling-Rodenhauser.

Sekundärkreis
Primärspule
feuerfester Körper
flüssige Schlacke
Magneteisen

Abb. 501 bis 503.
Öfen mit indirekter Widerstandsheizung, Induktionsöfen.

Sämtliche Bauarten von Induktionsöfen werden hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie, ferner zur Darstellung und zum Umschmelzen von Schwermetallen und Legierungen (Ferromangan, Bronze, Messing) verwendet.

Borchers, Entwicklung, Bau und Betrieb der elektrischen Öfen. 1897. Knapp. — Borchers, Elektrometallurgie. 1903. Hirzel. — Borchers, Die elektrischen Öfen. 1907. Knapp. — Escard, Les fours électriques et leurs applications industrielles. 1905. Dunod. — Goerges, Elektrische Öfen. 1914. Göschen. — Lyon, Keeney & Cullen, The electric Furnace in Metallurgical Work. 1914. Government Printing Office, Washington. — Millan, A Treatise on Electrometallurgy. 1910. Griffin & Co. — Moissan, Der elektrische Ofen. 1897. Krayn. — Neuburger, Handbuch der praktischen Elektrometallurgie. 1907. Oldenbourg. — Ponthière, Traité d'électrometallurgie. 1910. Gauthier-Villars. — Regelsberger, Elektrometallurgie. 1910. Göschen. — Stansfield, The Electric Furnace. 1914. Mc. Graw-Hill Book Co. — Wright, Electric Furnaces and their industrial Applications. 1904. Constable & Co.

(887) Elektrodenmaterial. Die Induktionsöfen arbeiten natürlich ohne Elektroden. — Bei den Lichtbogen- und Widerstandsöfen kann man nur in den seltensten Fällen Metalle als Elektrodenmaterial verwenden. — Bei einzelnen Elektrostahlöfen liegt ein — meistens mit Wasser gekühlter — Pol aus Stahl im Ofenfutter und ist entweder in direktem Kontakt mit dem flüssigen Einsatz oder mit einem in der Hitze leitend werdenden Leiter zweiter Klasse (Dolomit-Teer, Magnesit-Teer) überstampft.

Wo es irgend angeht, benutzt man die fabrikmäßig hergestellten Kohlenelektroden, die, da sie einerseits die Wärme sehr stark ableiten und sich dabei ihrer ganzen Länge nach sehr stark erhitzen, andererseits dem Abbrand unterworfen sind, bei großen Systemen in gekühlten Fassungen, die auch gleichzeitig der Stromzuleitung dienen können, gehalten oder geführt werden. Um abgebrannte Kohlen zu ergänzen und möglichst weit aufzubrauchen, schraubt man sie häufig mittels der bei der Herstellung vorgesehenen Schrauben bzw. Innengewinde aneinander. Sehr wichtig ist ein guter und sicherer Kontakt; es existieren dafür zahlreiche Vorschläge.

(888) Stromart und Schaltung. Man verwendet in der Regel Wechselstrom, meistens Drehstrom und schaltet diesen in den an sich aus der Beleuchtungstechnik bekannten Weisen an die im Ofen verteilten Elektroden.

Gleichstrom wird für den elektrischen Ofenbetrieb nicht gerne genommen. Abgesehen von den Übelständen in rein elektrotechnischer Beziehung kann die Verwendung von Gleichstrom Störungen durch elektrolytische Vorgänge hervorrufen, da wir es bei den hohen Temperaturen nur mit leitenden Körpern, seien es metallische Leiter (Einsatz) oder Elektrolyte (Schlacken), oder Leiter zweiter Klasse (Zustellungsmaterialien) zu tun haben.

Man hat bei dem Betrieb elektrischer Öfen stets mit einer gewissen Phasenverschiebung zu rechnen. Bei Lichtbogenöfen mittlerer Fassung wird man bei 50 Perioden mit einem $\cos \varphi = 0{,}8$ meistens auskommen. — Bei Induktionsöfen größerer Fassung muß man zur Erreichung einer annehmbaren Phasenverschiebung mit der Periodenzahl heruntergehen, so daß dann die Aufstellung besonderer Periodenumformer erforderlich wird.

(889) Der **Betrieb** der elektrischen Öfen ist entweder kontinuierlich, d. h. das Produkt wird unter regelmäßiger Zufuhr der Beschickung seiner Bildung entsprechend abgestochen oder diskontinuierlich, d. h. jede Beschickung wird für sich fertig gemacht. Diese letztere Art wird hauptsächlich bei der Stahlraffination ausgeführt, wo es auf sehr genaue Überwachung des Prozesses ankommt; die hier gebrauchten Öfen sind auch, gleichgültig, ob Elektroden- oder Induktionsöfen, kippbar eingerichtet, um das Schmelzgut nach Beendigung des Raffinationsprozesses in Tiegel oder Formen ausgießen zu können. Bei Reduktionsprozessen sowie Karbidherstellung mit Widerstands- oder Lichtbogenheizung hat man neben Abstich auch Blockbildung, zu welchem Zweck der Ofenherd senkbar und auf Wagen fahrbar angebracht ist, um nach Ansammlung einer genügenden Menge des Produkts den etwas abgekühlten Ofen leicht auseinandernehmen und das auf dem Herd in Form eines Blocks liegende Produkt entfernen zu können. Mit Blockbildung arbeitet man auch bei der Graphit- und Karborundumfabrikation.

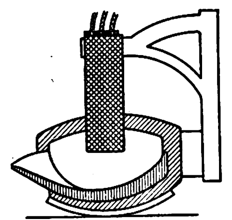


Abb. 504. Héroults kippbarer Elektrostahlofen

Anwendungen der elektrischen Öfen in der chemischen und metallurgischen Industrie.

(890) Allgemeines. Die elektrische Erhitzung läßt sich an Stelle jeder andern Erhitzungsart gebrauchen; sie bietet beträchtliche Vorteile durch das Wegfallen der sonst häufig unvermeidlichen Verunreinigungen durch das Brennmaterial, durch die einfachere Ofenanlage, durch Erzielung höchster Temperaturen in Verbindung mit der Lokalisierung der Erhitzung und anderes.

Deren wichtigste Anwendung auf die Erzeugungen von Metall, Metalloiden sowie von chemischen Produkten — abgesehen von den schon besprochenen schmelzelektrolytischen Produkten — sollen in nachstehendem kurz besprochen werden.

(892) Karbide. Dies sind Verbindungen der Metalle mit Kohlenstoff; sie sind fast von jedem Metall bekannt und entstehen leicht, wenn Metalle oder ihre oxydischen Verbindungen bei hoher Hitze mit Kohle zusammentreffen. Es haben jedoch nur das Kalziumkarbid und das Siliziumkarbid größere technische und wirtschaftliche Bedeutung erlangt.

Kalziumkarbid, CaC_2, wird erhalten durch Erhitzen eines Gemisches von grobkörnigem Kalk mit grobkörnigem Koks im Verhältnis von 100 : 70—90 im elektrischen Lichtbogen- oder Widerstandsofen, der wegen der starken Verstäubung von Kalk und Kohle zweckmäßig mit Deckel und Gasabzug versehen ist. Über die Betriebsweise (889). Man rechnet für 1 kW und 24 Stunden eine Produktion von 6 kg Karbid von durchschnittlich 300 l Azetylengaslieferung auf 1 kg (0° und 760 mm Barometerstand).

Beim Überleiten von Stickstoff über elektrisch erhitztes Karbid nimmt dieses Stickstoff auf unter Bildung von Kalziumcyanamid, $CaCN_2$, das ein wertvolles Düngemittel ist, aber auch dadurch, daß es mit Wasserdampf in Ammoniak übergeht, Wichtigkeit besitzt.

Siliziumkarbid (Karborundum, Siloxikon, Silundum) entsteht bei elektrischer Erhitzung von Kieselerde (Quarz) mit Kohle, entspricht in reinem Zustand der Formel SiC, enthält aber wechselnde Mengen von Silizium, Kohlenstoff und Sauerstoff, je nach den Mischungsverhältnissen und der angewendeten Temperatur. Verfahren und Ofen sind im Prinzip von Acheson angegeben. Wegen seiner Härte ist es geschätzt als Schleifmittel, wegen seiner Feuerbeständigkeit und chemischen Widerstandsfähigkeit zur Bekleidung von Elektroden und Auskleidung von Retorten und Öfen für starke Erhitzung.

Nimmt man entsprechend weniger Kohlenstoff auf die angewandte Menge Kieselerde, so kann man auch Silizium, jedoch nicht kohlenstoffrei, erhalten. Bei Zusatz von Metalloxyden und der für deren Reduktion erforderlichen Menge Kohle entstehen deren Silizide, von denen hauptsächlich das Ferrosilizium ausgedehnte Verwendung findet.

Hönigschmid, Karbide und Silizide (Bd. 45 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

(892) Eisen und Stahl. Der elektrische Ofen wird in immer größerem Umfange in der Eisenindustrie, sei es zum Erschmelzen von Elektroroheisen, sei es im Stahlwerk verwendet.

Eine elektrische Roheisendarstellung ist wirtschaftlich nur in jenen Ländern durchführbar, in welchen man über billige Kraft verfügt und der Koks teuer ist.

Man muß nach den neuesten Ergebnissen schwedischer Öfen mit einem Verbrauch von rund 2000 kWh, 300 kg Koks und 5 kg Elektroden auf die Tonne Elektroroheisen rechnen.

Die elektrischen Hochöfen lassen sich unterscheiden in

a) Hochschachtöfen, welche dem rein thermischen Hochofen nachgebildet sind (Bauart Grönwall),

b) Niederschachtöfen, welche mehr elektrisch geheizten, den Karbidöfen nahestehenden, Tiegelöfen entsprechen (Bauarten Helfenstein, Lorentzen).

Die Verwendung des elektrischen Ofens in der Stahlindustrie schwankt in weiten Grenzen je nachdem, welchen Teil der Arbeiten man dem elektrischen Ofen überträgt und welchen Teil man den rein thermischen Einrichtungen (der Birne, dem Siemens-Martinofen) überläßt, bzw. ob man nur den Tiegelprozeß ersetzen will.

Die wichtigsten Operationen, zu welchen der elektrische Ofen im Stahlwerk herangezogen werden kann, sind die folgenden:

1. Das Einschmelzen von Schrott, Roheisen oder anderem kalten Einsatz.
2. Die Oxydationsperiode, in der alle jene Verunreinigungen aus dem flüssigen Schmelzgut entfernt werden, die durch Oxydation beseitigt werden können. Dazu ist auch das Herausfrischen des Kohlenstoffs und vor allem die Oxydation des besonders gefürchteten Phosphors zu rechnen.

3. Die Desoxydationsperiode, in welcher es sich darum handelt, die während der Oxydationsperiode vom Eisen aufgenommenen Oxyde und auch den Schwefel zu entfernen.

4. Das Fertigmachen des Stahles, also die Aufkohlung zur Erreichung des gewünschten Kohlenstoffgehaltes sowie der event. Zusatz von Legierungsmetallen.

Je nachdem, ob der elektrische Ofen diese Operationen ganz oder nur teilweise durchzuführen hat, kann man folgende mittlere Kraftverbrauchszahlen annehmen.

Annähernder Kraftverbrauch beim elektrischen Stahlschmelzen.

Vorgänge im Elektroofen		kWh/t
Stahl aus kaltem Roheisen allein		1500
Stahl aus flüssigem Roheisen allein		1100
Stahl aus kaltem Schrott allein		900
Stahl aus kaltem Roheisen und kaltem Schrott		700
Stahl aus flüssigem Roheisen und kaltem Schrott		600
Nachreinigung von flüssigem Flußeisen	Auf hochwertigen Stahl mit weitgehender chemischer Reinigung (Tiegelstahlqualität)	250
	Auf bessere Siemens-Martinqualität	120

Elektrostahlöfen werden schon bis zu 30 t Einsatz gebaut, doch geht man in der Regel wegen der anzustrebenden Gleichmäßigkeit des Materials nicht über 12—15 t Einsatz hinaus.

An Ofensystemen verwendet die Elektrostahlindustrie sowohl Strahlungs-, als direkte Lichtbogenöfen mit und ohne zusätzlicher Bodenheizung und endlich Induktionsöfen. Letztere haben insbesondere in den eigentlichen Edelstahlwerken Eingang gefunden.

Bonini, I processi termoelettrici della siderurgia moderna. 1914. Hoepli. — Erichhoff, Die elektrische Erzeugung von Stahl und Eisen. 1914. Hansa-Druckerei. — Engelhardt, Elektrische Induktionsöfen und ihre Anwendung in der Eisen- und Stahlindustrie. 1907. Springer. — Guarini, L'Etat actuel de l'Electrométallurgie du Fer et de l'Acier. 1905. Dunot. — Haanel, Kanadischer Regierungsbericht über die in Europa benutzten Ofen und Verfahren. 1904. Ottawa, Department of the Interior. — Haanel, Kanadischer Regierungsbericht über Elektroroheisenversuche in Sault St. Marie 1907. Ottawa, Department of the interior. — Keller, Contribution à l'étude des Fours électriques, appliqués à la Fabrication des Fers et des Aciers. 1909. Imprimerie génerale. — Kershaw, The electric Furnace in Iron and Steel Production. 1907. Printing and Publishing Co. — Kershaw, Electro-thermal Methods of Iron and Steel Production. 1913. Constable & Co. — Leffler & Odelberg, Bericht des schwedischen Jern Kontorets über elektrische Roheisenschmelzen. 1911. Norstedt & Söner. — Leffler & Nyström, Fortsetzung hiervon. 1912. Norstedt & Söner. — Matignon, L'Electrométallurgie des Fontes, Fers et Aciers. 1906. Dunot & Pinot. — Meyer, Geschichte des Elektroeisens. 1914. Springer. — Neumann, Elektrometallurgie des Eisens (Bd. 26 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie) 1907. — Neumann, Die technische Gewinnung von Eisen und Stahl im elektrischen Ofen. 1910. Vieweg. — Norwegisches Komité, Elektrisches Eisen- und Stahlschmelzen. 1911. Aschehong & Co. — Puccinelli, I Forni Elettrici nella Siderurgia. 1913. Avalle. — Rodenhauser & Schönawa, Elektrische Öfen in der Eisenindustrie. 1911. Leiner. — Ruß, Die Elektrostahlöfen. 1918. Springer.

(893) Ferrolegierungen. Diese werden heute zum großen Teil im elektrischen Ofen dargestellt, bzw. in solchen umgeschmolzen, um sie im schmelzflüssigen Zustande (für Desoxydationszwecke) zuzusetzen, was technische und wirtschaftliche Vorteile bietet. Wichtige Desoxydationsmittel sind das Ferrosilizium und das Ferromangan. Eine Reihe sonstiger Ferrolegierungen werden ferner in der Stahlindustrie verwendet, um dem Stahl gewisse chemische oder mechanische Eigen-

schaften zu erteilen, also bei der Herstellung der Edelstähle. Die wichtigsten bezüglichen Legierungen sind die des Eisens mit Chrom, Wolfram, Nickel, Molybdän, Vanadium und Titan.

Die wichtigsten Ferrolegierungen.

Legierung	Gehalt		Herstellungsweise	Kraftverbrauch auf 1 t Legierung
	an	%		
Ferromangan	Mn	30 bis 80	Reduktion von Mn-Erzen im Hochofen, seltener im elektr. Ofen	— 5500 bis 8500 kWh
Ferrochrom	Cr	60 bis 70	Reduktion von Chromeisenstein im elektr. Ofen	7000 bis 8000 kWh
Ferrowolfram	W	70 bis 85	Reduktion von Wolframit od. Scheelit im elektr. Ofen	6000 bis 7000 kWh
Ferrosilizium	Si	50 bis 95	Reduktion von Eisenoxyden und Quarz im elektr. Ofen	5000 bis 7000 kWh bis zu 11000 kWh bei hochproz. FeSi
Ferronickel	Ni	—	Zusammenschmelzen von Eisen u. Nickel oder durch Reduktion im elektr. Ofen	— 11000 bis 15000 kWh
Ferrotitan	Ti	50 bis 55	Reduktion von Rutil im elektr. Ofen	5200 bis 11000 kWh
Ferromolybdän	Mo	50 bis 85	Reduktion von Molybdänit im elektr. Ofen	6600 bis 13000 kWh
Ferrovanadium	V	25 bis 50	Reduktion von Eisenvanadat oder Vanadinsäure im elektr. Ofen	

Helfenstein, Der elektrische Ofen, mit besonderer Berücksichtigung der technischen Ferrosiliziumerzeugung. 1910. Vieweg. — Pick & Conrad, Die Herstellung von hochprozentigem Ferrosilizium im elektrischen Ofen. 1909. Halle. — Rodenhauser, Ferromangan als Desoxydationsmittel. 1915. Leiner.

(894) Zink. In der Elektrometallurgie wird der elektrische Ofen nach zweierlei Richtung angewendet. Einerseits als Widerstandsofen zur direkten Reduktion von Zinkerzen, wobei ein mehr oder weniger verunreinigtes Rohzink gewonnen wird (Kraftverbrauch etwa 8000 kWh/t), andererseits als Strahlungsofen, in welchem Rohzink zu Feinzink umdestilliert wird (1000—2000 kWh/t).

Askenasy, Die elektrothermische Zinkgewinnung. 1910. Vieweg.

(895) Kupfer. In der direkten Reduktion des Kupfers aus den Erzen, welche technisch ohne weiteres möglich ist, hat der elektrische Ofen bisher nicht Fuß fassen können, hauptsächlich wegen des hohen Kraftverbrauches (5—20000 kWh auf die Tonne Kupfer, je nach dem Gehalt des Erzes). Hingegen wird der elektrische Ofen immer mehr zur Darstellung und zum Umschmelzen von Kupferlegierungen (Bronze, Messing) herangezogen. Hierbei hat der Induktionsofen entschiedene Vorteile (geringerer Abbrand). 300—450 kWh sind zum Umschmelzen einer Tonne Messing im Induktionsofen erforderlich, je nachdem ob man gutes, stückiges oder verunreinigtes, leichtes Rohmaterial (Spähne, Patronenhülsen) einschmilzt.

(896) Sonstige Metalle und Verschiedenes. In der Elektrometallurgie des Nickels, Bleis, Antimons, Zinns, Goldes und anderer Metalle ist der elektrische Ofen nur vereinzelt und meistens nur versuchsweise zur Anwendung gekommen.

Er wird auch zur Herstellung von Phosphor, Schwefel-Kohlenstoff, Natriumsulfid usw. benutzt, doch handelt es sich auch hier nur um vereinzelte Ausführungen.

V. Wirkungen elektrischer Entladungen.

(897) Arten der Entladung. Man unterscheidet die stille elektrische Entladung und die Funken- und Flammbogenentladung. Wenn es sich auch bei deren Verwendung um Reaktionen mit innerem Wärmeverbrauch (endothermische Reaktionen) handelt, die sich entweder zwischen gasförmigen oder doch während der Reaktion vergasten Stoffen abspielen, so sind sie doch — abgesehen von inneren Verschiedenheiten — in ihrer Wirkungsweise und mithin auch in ihrer Technik dadurch verschieden, daß die Reaktionen in stiller elektrischer Entladung infolge der großen Verdünnung und des verhältnismäßig geringen Energieverbrauchs auf die Flächeneinheit im Gegensatz zu den Flammenbogenreaktionen sich leichter auf der Umgebungstemperatur erhalten lassen. Da aber bei beiden neben der thermischen Wirkung offenbar noch andere Umstände, z. B. Ionisierungserscheinungen, eine Rolle spielen, Bedingungen, die auch bei der Konstruktion der Apparate zu berücksichtigen sind, so wird dieses Gebiet elektrothermischer Reaktionen, das man auch unter dem Namen der Gasreaktionen zusammenfaßt, zweckmäßig getrennt von den anderen elektrothermischen Prozessen behandelt.

(898) Die stille elektrische Entladung, ein fortwährendes Übergehen von Elektrizität zwischen Leitern (Belegungen), welche durch einen Gasraum und eine dielektrische Schicht oder zwei dielektrische Schichten (Glas, Glimmer) getrennt sind, vermag elementare Gase zu vereinigen und gasförmige Verbindungen zu trennen. Auch eine Reihe interessanter organischer Synthesen sind damit ausgeführt worden. Die wichtigste Anwendung ist die der Darstellung von Ozon aus dem Sauerstoff der Luft.

Man arbeitet dabei mit hohen Spannungen (sekundäre Ströme) und entweder mit unterbrochenem Gleichstrom oder mit Wechselstrom. Von der großen Anzahl Ozonapparate hat der von Siemens & Halske wohl die meiste Anwendung gefunden.

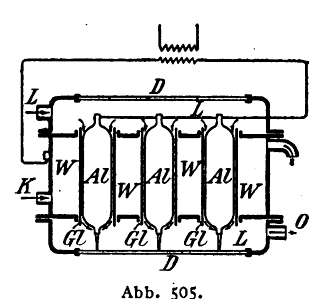


Abb. 505.
Siemens & Halske, Ozonapparat.

Deren neuester Apparat, s. Abb. 505, wie er vorzugsweise für Bereitung des Ozons zur Wasserreinigung dient, besteht aus einem die eine Elektrode bildenden Aluminiumzylinder (*Al*), welcher in einem Abstand von wenigen Millimetern von einem Glasrohr (*Gl*) umgeben ist. Das letztere ist in einem mit Wasser (*W*), das die andere Elektrode bildet, gefüllten Eisenkasten flüssigkeitsdicht eingesetzt; zwischen Glaszylinder und Aluminiumrohr strömt die Luft (*L*) durch, deren Sauerstoffgehalt unter der Einwirkung der von einem hochgespannten Strom (8500 V) ausgelösten dunklen (bläuliches Licht) elektrischen Entladung zu einem hohen Grade in Ozon (*O*) verwandelt wird. Je 6—8 solcher Glasrohre sind in einem Apparate und diese wieder zu mehreren in einem System sowohl für den Strom wie für die Luft parallel geschaltet. (*D* ist ein Glasdeckel, *K* bedeutet Kühlwasser.)

Weiterhin sind Ozon-Apparate ausgeführt von Tindal, der ohne Dielektrikum, aber mit vorgeschaltetem Glyzerinalkohol-Widerstand zur Vermeidung von Funken arbeitet, von Abraham und Marmier, die große metallisch belegte Glasplatten verwenden, von Otto, der in einem Metallkasten isoliert auf einer Welle dünne Aluminiumscheiben rotieren läßt.

Man bedient sich der ozonbildenden Wirkung der dunklen Entladungen zur Wasserreinigung im großen, hat aber auch geeignete Apparate für den Kleinbedarf geschaffen (unter anderen die Felten & Guilleaume-

Lahmeyer-Werke), welche leicht an die Pumpe oder Wasserleitung angeschlossen werden können und im letzteren Falle so eingerichtet sind, daß die Ozonisation mit dem Öffnen des Wasserhahns in Tätigkeit tritt und so lange und in dem Verhältnis arbeitet, als Wasser entnommen wird.

Das Ozon findet, außer zur Sterilisation von Trinkwasser, noch eine ganze Reihe industrieller und gewerblicher Anwendungen.

Fox, Ozone and Antozone. 1873. London. — Engler, Historisch-kritische Studien über das Ozon. 1879. Engelmann. — Frölich, Über das Ozon, dessen Herstellung und Anwendungen. 1891. Springer. — De la Coux, L'Ozone et ses applications industrielles. 1910. Dunot & Pinot. — Vosmaer, Ozone, its manufacture, properties and uses. 1916. Constable & Co. — Fonrobert, Daz Ozon. 1916. Enke.

(899) Funkenentladungen und Flammenbogen (Hochspannungsbogen). Hier finden die Reaktionen infolge der auf einen kleinen Raum konzentrierten großen Energiemengen bei sehr hoher Temperatur statt. Die in den Lichtbogen eingeführten Gasteilchen erleiden durch die plötzliche Temperatursteigerung eine ebenso plötzliche Drucksteigerung, die auch für die Reaktion wieder von Bedeutung wird. Außerdem aber wird durch die Temperatursteigerung der Gleichgewichtszustand der in Reaktion tretenden Stoffe steigend im Sinne der Bildung der endothermischen Verbindung geändert, so daß diese bei der hohen Temperatur des Bogens sich im beträchtlichen Maße in dem Gemenge anhäuft. Nun verläuft aber die Kurve des Gleichgewichtszustandes bei Temperaturabnahme bis zu einem gewissen, für jede Verbindung verschiedenen Temperaturpunkt in gleicher Weise umgekehrt. Es würde deshalb die durch die Entladung entstandene Verbindung überhaupt nur in der diesem Punkt entsprechenden Menge, unter Umständen also überhaupt nicht, gewonnen werden können, wenn nicht diese Gleichgewichtsänderungen, da sie auf Reaktionsgeschwindigkeiten beruhen, von der Zeit, innerhalb deren die Temperaturabnahme verläuft, abhängig wären. Für die technisch wichtigste der so endothermisch zu gewinnenden Verbindungen, das aus Luft erhältliche Stickoxyd, hat es sich nun herausgestellt, daß die Reaktionsgeschwindigkeit, welche bei etwa 4000° unmeßbar groß ist, je weiter nach unten um so geringer und bei etwa 600° Null wird, bei welcher Temperatur also weder eine Bildung noch eine Zersetzung von Stickoxyd stattfindet. Für den Techniker ergibt sich hieraus die wichtigste Regel, das Reaktionsgemisch so rasch als möglich von seiner Bildungstemperatur auf seine Beständigkeitstemperatur abzukühlen, was man als Arbeiten im heißkalten Raum zu bezeichnen pflegt.

Mit Funkenentladung wurde anfangs viel gearbeitet; insbesondere hatte ein Apparat der Atmospheric Products Co. an den Niagarafällen, der aus 2 konzentrischen Zylindern bestand, die mit vielen im Ringraum radial zueinander im Kreise gestellten und so vielfach übereinander angeordneten Platinspitzen besetzt waren, und deren innerer rotierte, wodurch ein ständiges Abreißen und Bilden von Stromübergängen in Funkenform eintrat, mit guten Ergebnissen hinsichtlich der Konzentration des erhaltenen Stickoxyd-Luftgemenges gearbeitet, erwies sich aber im Vergleich zur Gesamtausbeute als zu kompliziert und unwirtschaftlich, besonders nachdem zunächst Birkeland und Eyde gelehrt hatten, den Flammenbogen künstlich auszubreiten und so weitaus bedeutendere Energiemengen auf verhältnismäßig kleinerem Raum zu verwenden und gleichzeitig größere Luftmengen durchzusetzen.

Zu diesem Zwecke werden von Birkeland und Eyde mitten durch die Breitseiten eines hohen, sehr schmalen Ofens aus feuerfestem Tone zwei große kräftige Elektromagnetpole geführt, die den durch gekühlte, auf der Schmalseite senkrecht zu ihnen in das Ofeninnere ragende Elektroden gebildeten Flammenbogen zu einer Scheibe von etwa 1,5 m Durchmesser auseinanderziehen, während gleichzeitig durch die Wandung in den schmalen Ofenraum Luft hineingepreßt wird. Die entstehenden Stickoxydverbindungen werden abgeleitet und geben bei der darauffolgenden Abkühlung mit dem überschüssigen Luftsauerstoff Stickstoff-

tetroxyd (NO_2), das in Rieseltürmen z. T. in Salpetersäure übergeführt wird, während die entweichenden Gase von Kalkmilch oder Alkalilaugen absorbiert werden und damit zunächst Nitrate und Nitrite bilden. Ein einziger Ofen kann bis zu 500 kW aufnehmen und gibt in 24 Stunden etwa 1300 kg Salpetersäure (als HNO_3 berechnet). Dabei ist die Bedienung sehr einfach, da es sich nur um die Beaufsichtigung und Regelung des Stromes und Luftzufuhr handelt; 1 Arbeiter kann daher 3 Öfen bedienen.

Nach anderen Konstruktionen läßt man den Lichtbogen im Kreise oder in einer Schraube u. a. rotieren oder bläst ihn mittels der zu behandelnden Gase selbst zwischen Hörnerelektroden aus, wobei Vorkehrungen getroffen sind, daß er sich sofort wieder unten an den engsten Stellen der Elektroden entzündet.

Ganz abweichend hiervon ist das Verfahren der Badischen Anilin- und Sodafabrik (Schönherr), welches sich durch seine große Einfachheit, vor allem Vermeidung besonderer Magnete zur Verbreiterung des Lichtbogens auszeichnet. Es werden nämlich in langen eisernen Rohren dauernde Lichtbogen von großem Energieinhalt mittels je oben und unten (isoliert) eingesteckter Elektroden unter gleichzeitigem Durchstreichen von Luft, die den dicken Lichtbogenkern mantelförmig umhüllt, erzeugt.

Die neuen Lichtbogenverfahren arbeiten mit Stromstärken von 50—300 A bei 3000—5000 V und Luft von etwa Atmosphärendruck. Die den Lichtbogen verlassende Luft hat zwischen $1^1/_2$ und 3 Vol.-Proz. NO.

Donath & Frenzel, Die technische Ausnutzung des atmosphärischen Stickstoffs. 1907.

Außer der Salpeter- und Salpetersäureerzeugung hat man die Funkenentladung auch zum Altern und Veredeln des Weins und alkoholischer Flüssigkeiten überhaupt, zum Bleichen und Sterilisieren von Mehl, zur Reinigung von Filterkohle und anderem vorgeschlagen.

(900) Elektrokultur. Wenn auch die Art der Einwirkung der Elektrizität auf die Beförderung des Pflanzenwachstums noch nicht geklärt ist, so mag sie hier doch ihre Stätte finden, da sie sich vorzüglich in Form der Bestrahlung wirksam zeigt, wenn gleich auch das verschiedene Verhalten der Pflanzen, je nachdem sie mit dem positiven (anscheinend günstiger, vielleicht durch elektrosmotischen Wassertransport (?)) oder negativen Pol in Berührung kommen, auf eine elektrolytische, verbunden mit elektrosmotischer Wirkung hindeutet.

Das Gebiet ist über das Versuchsstadium noch nicht hinausgekommen.

VI. Elektroendosmose.

(901) Allgemeines. Die elektrosmotische oder kataphoretische Wirkung beruht auf der Eigenschaft fein verteilter, fester oder kolloider Stoffe, die in einer leitenden Flüssigkeit suspendiert bzw. kolloidal gelöst sind, unter der Einwirkung einer genügend großen, in einer Richtung wirkenden Potentialdifferenz dem einen Pole zuzuwandern und sich dort anzuhäufen, während die Flüssigkeitsteilchen nach dem anderen Pole hin abgestoßen werden; diese Wanderung der Flüssigkeit läßt sich auch bei festen (porösen) Diaphragmen beobachten, welche ähnlich wie fein verteilte suspendierte Stoffe wirken, und bei denen sich dann zu beiden Seiten ein der Potentialdifferenz proportionaler Niveauunterschied ergibt. Die Richtung, in der die Flüssigkeitsteilchen bzw. die losen festen Stoffe wandern, hängt ab von der Natur beider. Bei wässeriger Flüssigkeit wandert diese meist in der Richtung des positiven Stromes (zur Kathode), die suspendierten Stoffe dagegen gehen an die Anode; in saurer Lösung wandern viele Kolloide nach der Kathode, in alkalischer nach der Anode.



Die kataphoretische Wirkung hängt nicht ab von dem Faradayschen Gesetze; die diesem entsprechenden elektrolytischen Wirkungen gehen vielmehr nebenher, doch beträgt die auf die Elektrolyse entfallende Energie wegen der meist hohen für die Elektrosmose erforderlichen Spannung nur einen geringen Bruchteil der Gesamtenergie. Um elektrosmotische Wirkungen rein durchzuführen, sind hohe Spannungen erforderlich und daher gut leitende Lösungen sowie etwa der Zusatz von Leitsalzen zu vermeiden.

Für den durch Elektrosmose hervorgerufenen Niveauunterschied H zwischen den beiden Seiten eines porösen Diaphragmas gilt die Gleichung

$$H = K \cdot \frac{I \cdot \varrho \cdot d}{q} = K \cdot E,$$

wo ϱ der spezifische Widerstand der Lösung, E der Spannungsabfall zwischen den beiden Seiten des Diaphragmas, d die Dicke und q der Querschnitt des Diaphragmas ist. S. Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik, IV. Bd. 1, 1909, S. 615 u. f.

Die Elektrosmose hat große Bedeutung für die Lebenserscheinungen tierischer und pflanzlicher Organismen. Sie hat ferner Anwendung in verschiedenen technischen Gebieten gefunden.

(902) Anwendungen. Die Anwendungen der Elektrosmose betreffen teils Hilfsverfahren (Zusatz von Kolloiden bei der elektrolytischen Raffination von Blei, Silber, Bronze), teils selbständige Gebiete. — Letztere hat besonders die Elektrosmose (Graf Schwerin) A.-G. ausgebildet. Die wichtigsten Anwedungsgebiete sind: Entwässerung breiiger Stoffe (Ton, Alizarinpaste, Torf, Seeschlick), Auslaugung von Rübenschnitzeln, Reinigung von Zuckerlösungen, Konzentration von Kolloidlösungen, Entfernung schädlicher Bestandteile aus Serum, Reinigung von Fasermaterial, Entölung von Kondenswasser usw. Auch die verschiedenen, sogenannten elektrischen Schnellgerbeverfahren, welchen insbesondere während des Weltkrieges erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt wurde, sind im wesentlichen auf kataphoretischen Vorgängen begründet.

Galvanotechnik.

(903) Allgemeines. Stromquellen. Als Stromquellen kommen Dynamomaschinen, Akkumulatoren, galvanische Elemente und Thermosäulen in Betracht. Je nach der erforderlichen Spannung und Stromstärke werden die Akkumulatoren oder galvanischen Elemente hintereinander oder nebeneinander geschaltet.

Schaltung der Bäder. Auch die Bäder können sowohl hintereinander als auch nebeneinander geschaltet werden. Bei gleichem Stromstärkebedarf schaltet man die Bäder hintereinander, bei gleichem Spannungsbedarf nebeneinander.

Regulierung des Stromes. Den Stromregulatoren (Drahtwiderständen, Rheostaten) fällt die Aufgabe zu, die Stromspannung in einem Stromkreis zu regulieren. Die Regulatoren können, je nach dem Zwecke, dem sie zu dienen haben, entweder nach dem Schema der Hintereinander- oder dem der Parallelschaltung in den Stromkreis eingeführt werden. Bei der Hintereinanderschaltung vermindert der Widerstand die Spannung, da er dem Bade vorgeschaltet wird. Bei der Parallelschaltung wird eine bestimmte dem Widerstande entsprechende Stromstärke durch ihn fließen, während ein Zweigstrom in das Bad eintritt.

Zur Beurteilung von Stromstärke und Stromspannung benutzt man Strommesser (Amperemeter) und Spannungsmesser (Voltmeter). Der erstere wird in die Hauptleitung eingeschaltet, der letztere in eine Zweigleitung.

Erzielung brauchbarer Metallniederschläge. Neben der genauen Regulierung des Stromes müssen sich Anoden und Waren an allen Stellen in gleicher

Entfernung befinden. Gegenstände mit starken Profilierungen und Unterschneidungen entfernt man möglichst weit von den Anoden und arbeitet gleichzeitig mit Handanoden. Es ist ferner eine Bewegung des Elektrolyts, unter Umständen auch der Waren im Auge zu behalten. Für viele Zwecke, besonders die Erzielung starker galvanischer Niederschläge, ist die Erwärmung des Elektrolyts nötig.

Galvanostegie.

(904) Vorbehandlung der Gegenstände. Bevor die Gegenstände mit einem galvanischen Überzuge versehen werden können, müssen sie fettfrei und frei von Oxydschichten sein. Die Behandlung ist teils eine mechanische, teils chemische, teils kombinierte. Bei Versilberungen und Vergoldungen hat der Reinigungsarbeit eine Verquickung zu folgen, bevor der Elektroplattierprozeß begonnen werden kann.

(905) Versilberung. Anoden aus Silber. — Zimmertemperatur. Die Bäder bestehen in der Regel aus Lösungen von Cyansilber und Cyankalium von verschiedenem Gehalt, je nachdem es sich um leichte oder starke Versilberung handelt. Badspannung 1,2—0,9 V, Stromdichte 0,3 A/dm². Kupfer und dessen Legierungen werden nach erfolgter Verquickung direkt versilbert, Gegenstände aus sonstigen Metallen in der Regel vorher verkupfert oder vermessingt.

Aus alten Bädern kann das Silber durch Fällung mit Eisen oder Zink wiedergewonnen werden.

(906) Vergoldung. Anoden löslich (Gold) oder aus Ersparnisgründen unlöslich (Platin, Kohle). Zimmertemperatur oder 50—60°. — In der Regel cyanalkalische Bäder, die entweder auf elektrolytischem Wege aus Goldanoden oder durch Lösen von Knallgold in Cyankalium hergestellt werden. Man arbeitet je nach der Bad temperatur mit 1,0—1,2 V bei Goldanoden und Stromdichten 0,1—0,07 A/dm².

Silber, Kupfer, Nickel und deren Legierungen vergoldet man direkt, die übrigen Metalle nach vorheriger Verkupferung oder Vermessingung.

Das Gold aus alten Bädern kann durch Fällung mit Zinkstaub wiedergewonnen werden.

(907) Verkupferung. Anoden Elektrolytkupferplatten oder ausgeglühtes, nicht zu dünnes Kupferblech. Man verkupfert entweder bei Zimmertemperatur oder in der Kälte. — Die Bäder sind in der Regel cyanalkalisch und enthalten das Kupfer als essigsaures Kupfer unter Beifügung von saurem, schwefligsauren Natrium zugesetzt. Badspannung etwa 3 V bei 0,3—0,4 A/dm². — Die Wiedergewinnung des Kupfers aus aufgebrauchten Bädern lohnt in der Regel nicht.

(908) Vermessingung. Anoden nicht zu dünnes, ausgeglühtes und wieder blank gemachtes Messingblech. — Zimmertemperatur. Ebenfalls cyanalkalische Bäder, die man entweder aus den Sulfaten der Metalle und Cyankalium oder direkt aus den Zink- bzw. Kupferkaliumdoppelcyaniden unter Zusatz von Cyankalium herstellt. Man gibt dann noch Zusätze verschiedener Alkalisalze, wie saurer Sulfite, Sulfate, Karbonate usw. Badspannung etwa 3 V bei 0,3 A/dm². — Die Anodenfläche soll größer als die Warenfläche sein.

(909) Vernickelung. Anoden aus gewalzten oder gegossenen Nickelplatten. — Zimmertemperatur oder in der Wärme (70—80°). Zur Herstellung der Nickelbäder verwendet man in der Regel Nickelsulfat oder Nickelammoniumsulfat, mitunter auch Chlornickel oder äthylschwefelsaures Nickel unter Zusatz verschiedener Alkalisalze, wie Salmiak, zitronensaures Natrium, Natrium- oder Magnesiumsulfat. Bei einzelnen Bädern wird auch Borsäure zugesetzt. Je nach der Badzusammensetzung und dem Metall, welches vernickelt wird, wird die Anodenfläche größer

oder kleiner als die Warenfläche genommen. — Bei kalten Bädern hat man 2—3 V bei Stromdichten von 0,3—0,5 A/dm², bei warmen Bädern von 1,3 V bei 2 bis 2,5 A/dm².

(910) Verkobaltung. Anoden aus gegossenen oder gewalzten Kobaltplatten. Das Bad besteht aus Kobaltammoniumsulfat und Borsäure. Spannung 2,75 V bei 0,4 A/dm².

(911) Verstählung. Anoden aus Stahlblech. — Die Verstählung wird meistens bei höherer Temperatur durchgeführt.

Als Elektrolyt verwendet man meistens Eisenchlorid mit oder ohne Zusatz sehr hygroskopischer Chloride, wie z. B. Chlorkalzium. — Je nach der Temperatur und den zugesetzten Leitsalzen kann man Stromdichten bis zu 20 A/dm² erreichen.

(912) Verzinkung. Zinkanoden von möglichst großer Oberfläche. Bei flachen Gegenständen 18—20°, bei stark profilierten 40—45°. — Für Herstellung der Bäder verwendet man meistens Zinkvitriol und setzt in der Regel Ammonsalze (Sulfat, Citrat, Chlorid) zu. — Je nach der Badzusammensetzung und Temperatur 0,75—3,5 V bei 0,3—4,3 A/dm².

(913) Verzinnung. Anoden gegossene Zinkplatten. Anwendung kalt oder in der Wärme. Die Bäder werden in der Regel aus Zinnchlorid unter Verwendung verschiedener Zusätze (Natriumpyrophosphat, Cyankalium, Alkalikarbonate, Ätzalkalien) hergestellt. 0,8—1,25 V bei 0,25—1 A/dm².

(914) Verbleiung. Anoden gegossene oder gewalzte Bleiplatten. — In neuerer Zeit verwendet man meistens kieselfluorwasserstoffsaure Bleibäder.

(915) Verplatinierung. Anoden aus Platinblech. Anwendung in der Wärme. Die Bäder werden meistens aus Alkaliplatindoppelchloriden hergestellt. Als Zusätze verwendet man Zitronensäure, Chlorwasserstoffsäure und milchsaure Alkalien. Bei den milchsauren Bädern 1,6 V bei 0,15—2 A/dm².

Aus aufgebrauchten Bädern wird das Platin durch Fällung mit Zinkstaub wiedergewonnen.

(916) Verantimonierung. Anoden aus metallischem Antimon. Bäder aus Schlippeschem Salz und Natriumkarbonat. 1,9—3,2 V bei 0,35 A/dm². — Auch bei Antimon werden milchsaure Bäder empfohlen.

(917) Aluminium. Das galvanische Niederschlagen von Aluminium aus wässerigen Lösungen ist nicht möglich. Auch das galvanische Überziehen von Aluminium mit anderen Metallen macht Schwierigkeiten und erfordert besondere Maßnahmen, über welche eine ganze Reihe von Vorschriften besteht.

Galvanoplastik.

(918) Allgemeines. Die Galvanoplastik bezweckt die Erzeugung von Metallen auf galvanischem Wege in einer solchen Stärke, daß sie sich ohne Unterlage gebrauchen lassen. Während die Galvanostegie sich bestrebt, einen festhaftenden Metallüberzug auf einem anderen Metall hervorzubringen, fällt diese Forderung bei den galvanoplastischen Erzeugnissen nicht nur weg, sondern man verlangt im Gegenteil, daß die Metallablagerung sich bequem abnehmen lasse. Während es zudem durch die bisher besprochenen Verfahrungsweisen nur möglich war, Metallabscheidungen auf einem Metalle hervorzubringen, müssen galvanoplastische Reproduktionen von Gegenständen jeglichen Materials möglich sein. Hierbei erzeugt man entweder von einem Gegenstand auf galvanischem Wege das Spiegelbild in Metall, oder man überzieht die Gegenstände allseitig mit Metall. Man spricht deshalb auch von einer eigentlichen Galvanoplastik und einer Überzugsgalvanoplastik. Da aber die Aus-



führung in beiden Fällen die gleiche ist, so sind hier diese Unterschiede nicht weiter zu beachten. Bei der Ausführung von galvanoplastischen Arbeiten sind 3 Momente als gleich wichtig zu berücksichtigen: 1. die Herstellung der Formen, 2. ihre Leitendmachung und 3. die Ausführung der galvanoplastischen Reproduktion.

(919) Die Formen erzeugt man

1. aus Metall, a) durch Anwendung leicht schmelzbarer Legierungen, b) durch Abdruck in Blei, c) durch galvanoplastische Reproduktion,
2. aus Guttapercha,
3. aus Wachsguß,
4. aus Gips,
5. aus Leim, der durch chemische Mittel (Chromsäure-Belichtung, Formalin oder Tannin) unlöslich gemacht wird.

(920) Leitendmachen der Formen. Wo nichtleitende Formen vorliegen, werden diese in den meisten Fällen mit reinstem Graphit leitend gemacht. Außerdem können in Frage kommen: Pulver von Metallen und Legierungen, Blattmetalle, leitende Schwefelmetalle, wie Schwefelsilber, durch Belichtung aus Jodsilber erhaltene Silberschichten usw.

(921) Ausführung der Galvanoplastik. Man arbeitet entweder mit dem sog. einfachen Apparate oder mit einem Apparate mit äußerer Stromquelle. Das letztere Verfahren ist wegen der leichteren Beaufsichtigung und der Gewähr, jederzeit eine tadellose Arbeit zu vollbringen, der ersteren entschieden vorzuziehen.

Beim Betriebe mit einfachem Apparate (Zellen- oder Trogapparat) wird wie bei der Instandsetzung einer Daniellschen Kette verfahren. In ein größeres äußeres Gefäß kommt die Kupfervitriollösung (1 l Wasser, 250 g Kupfervitriol); in die innere poröse Tonzelle verdünnte Schwefelsäure (1 : 30) und ein Zinkzylinder. Zweckmäßig ist es auch, etwas Amalgamiersalz (Merkurosulfat) hinzuzugeben. An den Zinkzylinder wird ein Kupferring gelötet, welcher zur Aufnahme der Formen, die in die Kupferlösung tauchen, dient. Für größere Anlagen verwendet man Wannen, bei welchen eine den vorangeschickten Ausführungen entsprechende Anordnung getroffen wird. Beim Betriebe mit äußerer Stromquelle verwendet man ein Bad aus 1 l Wasser, 30 g Schwefelsäure und 200 g Kupfervitriol, 0,5—2,8 V, 0,5—3 A/dm^2.

Für Schnellgalvanoplastik liegen verschiedene Vorschläge bezüglich der Badzusammensetzung, Betriebsspannung und Stromdichte vor. Für dauernde Bewegung der Elektrolyte ist mit Rücksicht auf eine gleichmäßige Metallabscheidung zu sorgen.

Die Galvanoplastik in Eisen, Nickel, Silber und Gold kann in analoger Weise wie die in Kupfer erfolgen und kommen dabei gleiche oder ähnliche Bäder zur Anwendung, wie sie bei galvanostegischen Arbeiten verwendet werden.

(922) Herstellung von Druckplatten, Klischees, Stereotypen usw. Diese werden meistens aus Kupfer auf galvanoplastischem Wege gewonnen. Um sie weniger der Abnutzung und der Einwirkung der Druckfarben zu unterwerfen, verstählt, vernickelt, verkobaltet man sie, oder man überzieht sie mit einem Hartnickelüberzug (Nickel mit 25—30 % Kobalt). Diese Überzüge dürfen nur verhältnismäßig dünn erzeugt werden, weil sonst die Feinheit der Zeichnung stark beeinträchtigt würde; denn bei galvanoplastischen Überzügen ist die letzte und grobkörnigste Metallschicht die Druckfläche. Um galvanoplastische Reproduktionen, bei welchen die erste und feinste Metallabscheidung Druckfläche wird, äußerst dauerhaft herzustellen, erzeugt man solche von Eisen oder Nickel.

(923) Irisierung, Brünierung, Patinierung auf galvanischem Wege. Die Anodenarbeit oder das sogenannte Arbeiten mit umgekehrtem Strome findet noch Anwendung zur Ausführung der galvanischen Ätzung, Irisierung, Brünierung und ähnlicher Metallfärbungen sowie der künstlichen Patinabildung.

Literatur: Hering, A., Die Galvanoplastik u. ihre Anwendung in der Buchdruckerkunst. 1898. — Jenisch, P., Handbuch für alle galvanosteg. u. galvanoplast. Arbeiten. 1905. — Kempe, C., Die Galvanoplastik. 1897. — Konwiezka, H., Galvanoplast. Apparate nebst Anleitung zum galvan. Verkupfern, Vernickeln, Versilbern u. Vergolden. 1909. — Krause, Galvanotechnik (Galvanosteg. u. Galvanoplastik). 1908. — Langbein, G., Handbuch d. elektrolyt. (galvan.) Metallniederschläge. 1906. — Langbein u. A. Frießner, Galvanoplast. u. Galvanostegie. 1904. — Lange, W., Die gesamte Galvanostegie. Die galvan. Verkupferung, Vernickelung, Versilberung usw. 1899. — Levett & Findeisen, Der Galvaniseur u. Metallschleifer. 1903. — Peters, F., Elektrometallurgie u. Galvanotechnik. 1900. — Pfannhauser, W., Die Herstellung von Metallgegenständen auf elektrolytischem Wege und die Elektrogravüre. 1903. — Pfannhauser, W., Die Galvanoplastik. 1904. Bd. 11 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Fitz-Gerald, Elektrolytische Verfahren zur Herstellung parabolischer Spiegel. 1904. Bd. 14 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Fitz-Gerald, Elektrolytische Verzinkung. Bd. 18 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Schlötter, M., Über die elektrolyt. Metallniederschläge. I. Teil 1910. II. Teil 1911. Bd. 37 u. 40 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Steinach, H. & G. Buchner, Die galvan. Metallniederschläge. 1896. — Stockmeier, H., Handbuch der Galvanostegie u. Galvanoplastik. 1899. — Taucher, K., Handbuch der Galvanoplastik. 1900. — Trost, G., Galvanoplastik und Galvanostegie. 1900. — Weiß, J., Die Galvanoplastik. Lehrbuch der Galvanoplastik und Galvanostegie. 1909.

Zwölfter Abschnitt.

Drahtlose Telegraphie und Telephonie.

(924) Allgemeine Aufgaben. Der Hochfrequenztechnik fallen bei der drahtlosen Nachrichtenübermittelung die Aufgaben zu:

1. aus den vorhandenen Kraftquellen einer Sendestation elektromagnetische Schwingungen zu erzeugen;
2. diese stehenden Schwingungen in fortschreitende elektromagnetische Wellen umzuwandeln, die sich an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre ausbreiten.
3. die im Empfänger einfallenden Wellen in stehende Schwingungen umzusetzen;
4. die empfangenen Schwingungen sinnlich wahrnehmbar zu machen.

Elektrische Schwingungen und Wellen.

(925) Geschlossene Schwingungskreise. Stehende Schwingungen erzeugt man zweckmäßig in einem geschlossenen Schwingungskreise; dieser besteht aus einem Kondensator und einer Spule.

Der Schwingungsvorgang besteht darin, daß in raschem Wechsel entweder der geladene Kondensator die Spule mit Strom speist, oder die stromdurchflossene Spule den Kondensator auflädt. Die Schwingung wird dadurch eingeleitet, daß man entweder den Kondensator lädt oder der Spule Strom zuführt.

Im ersten Falle unterbricht man die Strombahn an einer Stelle durch eine Funkenstrecke F (Abb. 506), an deren Polen man hohe Spannung zuleitet; diese lädt den Kondensator C so lange, bis die Funkenstrecke durchschlagen und damit elektrisch leitend wird. Jetzt entlädt sich der Kondensator, der Entladestrom magnetisiert den Raum in der Spule L; er steigt an, bis der Kondensator entladen ist. Dann nimmt der Strom ab; das verschwindende Magnetfeld hält ihn noch solange aufrecht, bis der Kondensator wieder geladen ist, und zwar mit entgegengesetztem Vorzeichen; dann wiederholt sich periodisch dieses Spiel in beständig wechselndem Sinne.

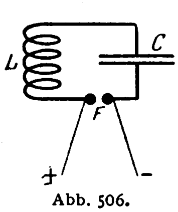


Abb. 506. Schwingungskreis mit Funkenstrecke.

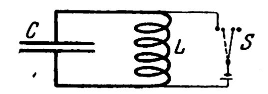


Abb. 507. Schwingungskreis mit Summer.

Zur Schwingungserzeugung durch Stromunterbrechung dient z. B. die Schaltung der Abb. 507. Im Speisekreis liegt ein Unterbrecher (Summer) S. Wird er geöffnet, so bleibt die Spule stromdurchflossen zurück, und der Schwingungsvorgang beginnt mit der Aufladung des Kondensators.

Die Zeit, welche eine volle Schwingung braucht, hängt von den Abmessungen des Kreises ab. Man trägt ihnen Rechnung durch die Kapazität C des Konden-

sators und die Selbstinduktion L der Spule. Die Anzahl o der Schwingungen, die der Kreis in 2π Sekunden ausführen kann, wird nach der Formel berechnet:

$$o = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Aus vielen Gründen, z. B. wegen des Leitungswiderstandes der Spule oder wegen der dielektrischen Verluste im Kondensator, wird im Schwingungskreise Wärme entwickelt. Dies geschieht auf Kosten der Schwingungsamplitude, die darum abklingt, wenn nicht dauernd die Verluste durch nachgelieferte Energie gedeckt werden. Den Verlusten trägt man durch eine Widerstandsgröße, den Dämpfungswiderstand R Rechnung; als Maß für das Abklingen kann der Dämpfungsexponent α dienen (112,3):

$$\alpha = \frac{R}{2L}.$$

Er ist der natürliche Logarithmus der in der Zeiteinheit verursachten Amplitudenabnahme. Die Dämpfung verkleinert auch die Frequenz, die streng nach der Formel berechnet wird:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{o^2 - \alpha^2}.$$

Rechnerisch bequemer ist es, zur Beschreibung des Abklingens das logarithmische Dekrement δ der Dämpfung zu benutzen, das ist der natürliche Logarithmus des konstanten Verhältnisses von zwei aufeinanderfolgenden Maximalamplituden:

$$\delta = \frac{2\pi\alpha}{\omega} = 2\pi \cdot \operatorname{tg}\varphi; \text{ also annähernd: } \delta = \pi R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Dabei ist φ eine durch die dämpfenden Einflüsse verursachte Phasenverzögerung der Ladung Q des Kondensators. Den Verlauf von I und Q nach der Zeit t beschreiben die Formeln:

$$I = Q_0 \cdot \frac{\omega^2 + \alpha^2}{\omega} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t.$$

$$Q = Q_0 \cdot \frac{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}{\omega} \cdot e^{- \quad t} \cdot \cos(\omega t - \varphi).$$

Die Eigenschaften der gebräuchlichen Sendekreise sind von der Größenordnung:

$$C = 0{,}01\ \mu\text{F} = 10^{-17}\ \text{cm}^{-1}\ \text{s}^2,$$
$$L = 0{,}1\ \text{mH} = 10^5\ \text{cm},$$
$$R = 1\ \Omega \quad = 10^9\ \text{cm s}^{-1}.$$

Die Eigenschaften der erzeugten Schwingungen haben also die Größenordnung:

$\omega = \quad {}^{6}\,\text{s}^{-1}$ (1 Million in 2π s).

$\alpha = 5000\ \text{s}^{-1}$ (Amplitude fällt in $\frac{1}{5000}$ s auf den 2,7ten Teil).

$\delta = 0{,}0314\ldots$ (Amplitude fällt in etwa 25 Schwingungen auf die Hälfte).

$\varphi = 0^\circ 17'$, ...

Der Einfluß des Dämpfungswiderstandes auf die Frequenz liegt in der fünften Dezimalstelle.



(926) Gekoppelte Systeme. Werden zwei schwingungsfähige Gebilde so angeordnet, daß sie sich gegenseitig beeinflussen können, so spricht man von einem gekoppelten System. Geschieht die Beeinflussung dadurch, daß die Spulen der beiden Kreise einander induzieren, so sind die Kreise magnetisch gekoppelt (Abb. 508). Die Kreise können auch vorwiegend durch ein gemeinsames elekelektrisches Feld gekoppelt sein, z. B. die Antennenkreise einer mit zwei Antennen ausgestatteten Station (Abb. 509). Haben die beiden gekoppelten Kreise einen gemeinsamen Konstruktionsteil, so spricht man von direkter Koppelung; sie kann z. B. galvanisch sein (Abb. 510), wenn ein Spulenstück, oder kapazitiv (Abb. 511), wenn ein Kondensator beiden Kreisen gemeinsam angehört.

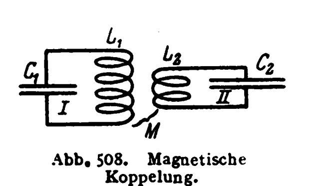


Abb. 508. Magnetische Koppelung.

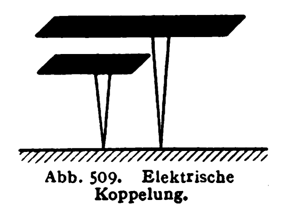


Abb. 509. Elektrische Koppelung.

Im Fall der magnetischen Koppelung gibt es eine besonders einfache Rechengröße, die als Maß für die Koppelung dient, nämlich den Ausdruck:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

L_1 und L_2 sind die Selbstinduktivitäten der Spulen der Kreise I und II, M ist die gegenseitige Induktivität der Spulen. Die Koppelung k ist stets kleiner als 1. Feste Koppelungen drückt man in Prozenten aus; z. B. 12% Koppelung bedeutet: $k = 0{,}12$. Mit abnehmender Gegeninduktivität wird die Koppelung loser und nähert sich dem Wert 0.

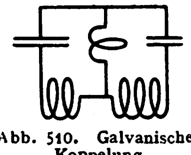


Abb. 510. Galvanische Koppelung.

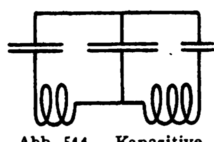


Abb. 511. Kapazitive Koppelung.

In gekoppelten Systemen sind zwei Schwingungen möglich; für die eine verlaufen die Schwingungen in beiden Spulen im gleichen Sinne, für die andere im entgegengesetzten Sinne. Mit abnehmender Koppelung nähern sich die Frequenzen und die Dekremente denen der Einzelkreise. Läßt man das gekoppelte Gebilde frei ausschwingen, so treten in jedem Einzelkreise beide Schwingungen auf und bilden Schwebungen. Sind o_1 und o_2 die Kreisfrequenzen der Einzelkreise, so sind im gekoppelten Gebilde zwei Frequenzen ω möglich, für die mit großer Annäherung die Formel gilt:

$$\omega^2 = \frac{1}{2(1-k^2)} \left\{ o_1^2 + o_2^2 \pm \sqrt{(o_1^2 - o_2^2)^2 + 4k^2 o_1^2 o_2^2} \right\}.$$

Der geringe Einfluß der Dämpfung auf die Frequenzen ist dabei unberücksichtigt geblieben. Strenge Formeln s. F. Kiebitz, Ann. Phys. Bd. 40, 1913, S. 150; Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 8, 1914, S. 45 ff.

Sind die beiden Kreise aufeinander abgestimmt ($o_1 = o_2 = o$), so treten zwei Schwingungen auf mit den Frequenzen:

$$\omega^2 = \frac{o^2}{1 \mp k}.$$

Die eine nähert sich mit steigender Koppelung dem Wert ∞, die andere dem $\sqrt{2}$ten Teil der Einzelfrequenz.

Wird dem ersten Kreise die Energie A zugeführt und dann das Gebilde sich selbst überlassen, so tritt im zweiten ein Strom auf mit dem von Mackû (Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 2, 1909, S. 263, Formel 32) berechneten Effektivwert:

$$\int_0^\infty I_2^2 dt = \frac{A \cdot o_1^2 \cdot k^2}{2L_2} \cdot \frac{\alpha_1 o_2^2 + \alpha_2 o_1^2}{\alpha_1\alpha_2 \cdot (o_1^2 - o_2^2)^2 + 4\alpha_1\alpha_2 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot (\alpha_1 o_2^2 + \alpha_2 o_1^2) + k^2 \cdot (\alpha_1 o_2^2 + \alpha_2 o_1^2)^2}.$$

Dieser Effektivstrom im zweiten Kreise hat bei loser Koppelung (k annähernd gleich 0) einen Höchstwert, wenn die Frequenzen der Einzelkreise übereinstimmen ($o_1 = o_2$), die Kreise also aufeinander abgestimmt sind. Das Auftreten dieses Höchstwertes ist eine sehr auffallende Erscheinung; sie wird als Resonanz bezeichnet und beherrscht alle Vorgänge in funkentelegraphischen Geräten; sie ist um so schärfer ausgeprägt, je kleiner die Dämpfungen sind.

Auf den Resonanzerscheinungen beruhen auch die Meßverfahren der Hochfrequenztechnik, vgl. Nesper, Die Frequenzmesser und Dämpfungsmesser der Strahlentelegr. 1907.

(927) Messungen. Als Maß für die Schwingungen der drahtlosen Telegraphie ist die Frequenz weniger im Gebrauch als die Wellenlänge λ. Diese Größe erhält man, wenn man die Dauer einer Schwingung $2\pi/\omega$ mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Vorgänge im freien Raum

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$$

multipliziert, also bei kleiner Dämpfung:

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 2\pi c \cdot \sqrt{L \cdot C} = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot c^2 C}.$$

Im magnetischen Maßsystem ist L eine Länge, ebenso $c^2 C$; zugleich ist $c^2 C$ das Maß der Kapazität im statischen System. Man erhält darum die richtige Maßzahl für λ, wenn man für L und $c^2 C$ die Längenmaße von Selbstinduktivität und Kapazität benutzt. Ist $L_{(\text{m})}$ bzw. $C_{(\text{m})}$ die Maßzahl der Selbstinduktivität bzw. Kapazität bei der Einheit 1 m, so ist

$$\lambda = 2\pi \cdot \sqrt{L_{(\text{m})} \cdot C_{(\text{m})}} \text{ m}.$$

Zur Messung der Wellenlänge dient der Wellenmesser. Er ist ein geschlossener Schwingungskreis und besteht meistens aus einem Satz von mehreren festen Spulen und einem Drehkondensator. Der Drehkondensator ist zuerst von Koepsel konstruiert worden und wird in vielen Abarten in der drahtlosen Telegraphie verwendet. Er gestattet, die Kapazität stetig zu verändern und besteht aus einem Satz von festen parallelen Metallplatten, die eine Belegung bilden; die andere Belegung bildet ein beweglicher Metallplattensatz, der zwischen dem ersten isoliert gedreht werden kann (Abb. 512).

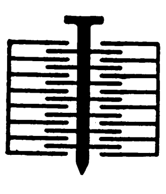
Die Meßkreise werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nach Wellenlängen geeicht (H. Diesselhorst, Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 1, 1907, S. 262 ff.).

Der Wellenmesser wird entweder als Empfänger benutzt und mit einem schwingenden Senderkreise in Resonanz gebracht; zu dem Zweck ist er mit Indikatoren für die bei Abstimmung auftretenden Schwingungen ausgerüstet; als

solche dienen empfindliche Hitzdrahtamperemeter oder Leuchtröhren oder Detektoren in Verbindung mit Telephon oder Galvanometer.

Andererseits kann man den Wellenmesser durch Stromstöße zur Eigenschwingung erregen und als Sender verwenden; zu dem Zweck wird er mit einem Tonsummer ausgestattet (Abb. 507); diese Verwendungsweise findet beim Messen von Empfangsgeräten statt.

Außer der Wellenlänge kann auch die Abstimmschärfe mit dem Wellenmesser bestimmt werden. Man trägt die mit dem Hitzdrahtinstrument beobachtete Stromstärke graphisch als Funktion der eingestellten Kapazität des Drehkondensators auf; so erhält man eine Resonanzkurve (Abb. 513). Ihre Theorie ist von V. Bjerknes (Wied. Ann. Bd. 55, 1895, S. 137 ff.) gelöst und vornehmlich von P. Drude (Ann. Phys. Bd. 13, 1904, S. 512 ff.) und M. Wien (Ann. Phys. Bd. 25, 1908, S. 625 ff.) ergänzt worden.



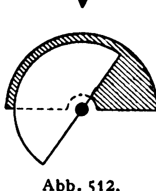


Abb. 512.
Drehkondensator.

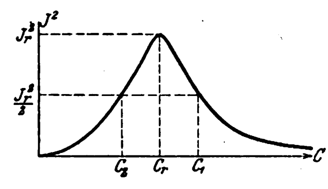


Abb. 513. Resonanzkurve.

Die Resonanzkurve verläuft um so spitzer, je kleiner die Dämpfung ist. Ihre Breite ist ein Maß für die Dämpfung. Praktisch stellt man die Kapazität C_r bei Resonanz ein, ferner die Kapazitäten C_1 und C_2, bei denen das Hitzdrahtinstrument den halben Resonanzausschlag zeigt. Dann ist die Summe der Dekremente des gemessenen Kreises δ_1 und des Wellenmessers δ_2:

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_r}.$$

δ_2 kann man messen, wenn man im Senderkreise ungedämpfte Schwingungen verwendet (C. Fischer, Ann. Phys. Bd. 28, 1909, S. 57).

Die Gleichung für die Dekrementsumme folgt aus der Gleichung für das Stromintegral (926) unter den vereinfachenden Annahmen, daß erstens die Dämpfung klein ist, C_1 und C_2 sich also wenig von C_r unterscheiden, und daß zweitens die Koppelung so lose ist, daß k^2 neben $\frac{\delta_1 \delta_2}{\pi^2}$ nicht in Betracht kommt. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Bjerknesschen Methode ist ferner, daß überhaupt konstante, d. h. von der Schwingungsamplitude unabhängige Dekremente vorliegen, was z. B. nicht der Fall ist, wenn ein Kreis eine Funkenstrecke enthält.

Man weiß nicht immer, ob die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der obigen Dämpfungsformel erfüllt sind; dann muß man nach der Formel:

$$\delta_1 + \delta_2 = \pi \cdot \frac{C_r - C}{C_r} \cdot \sqrt{\frac{I^2}{I_r^2 - I^2}}$$

die Dekremente aus allen beobachteten Punkten der Resonanzkurve einzeln bestimmen und prüfen, ob die Werte untereinander übereinstimmen.

Auf Resonanz beruhen noch sehr viele andere Messungen. Z. B. kann man Kondensatoren messen, indem man sie in einem Schwingungskreise durch einen geeichten Drehkondensator substituiert und diejenige Einstellung des Dreh-

kondensators sucht, für die er dieselbe Resonanz zeigt wie der unbekannte Kondensator.

Die Selbstinduktivität einer Spule mißt man, indem man sie mit einem bekannten Kondensator zu einem Schwingungskreise vereinigt, dessen Wellenlänge man durch Resonanz mit einem Wellenmesser bestimmt.

Koppelungsgrade findet man durch Messen der Koppelungswellen. Sind die beiden gekoppelten Kreise vorher aufeinander abgestimmt, und ergibt dann das gekoppelte System Resonanz bei den Kapazitäten C_1 und C_2 des Meßkreiskondensators, so ist der Koppelungsgrad:

$$k = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}.$$

Kann man die beiden Kreise nicht aufeinander abstimmen, so mißt man erst den einen allein, dann beide zusammen, während der Kondensator im zweiten Kreise kurz geschlossen ist (F. Kiebitz, Verh. Physik. Ges. Bd. 15, 1913, S. 1240 ff.). Hat der Kondensator des Meßkreises bei diesen beiden Einstellungen die Kapazitätswerte C_1 und C_2, so ist die Koppelung:

$$k = \sqrt{\frac{C_1 - C_2}{C_1}}.$$

Andere Meßmethoden bei H. Rohmann, Elektrische Schwingungen, Sammlung Göschen 1914.

(928) Offene Schwingungskreise. Außer in den geschlossenen Schwingungskreisen treten auch an offenen Gebilden, z. B. an einem einfachen Draht, elektromagnetische Schwingungen auf. Man bezeichnet auch solche Gebilde als Schwingungskreise, aber zum Unterschied von den geschlossenen als offene. Bei ihnen sind die magnetischen Kräfte nicht mehr in einer Spule von definierter Selbstinduktion lokalisiert, die elektrischen Kräfte nicht in einem Kondensator von definierter Kapazität; sondern jeder Teil des Leiters bildet sowohl ein elektrisches als auch ein magnetisches Feld.

Man spricht auch in diesem Falle von Kapazität oder Selbstinduktivität, indem man Spulen oder Kondensatoren substituiert denkt, welche die gleichen Energie-, Frequenz-, Koppelungs- oder Dämpfungsverhältnisse ergeben würden.

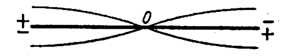


Abb. 514. Spannungsverteilung am geradlinigen Oszillator.

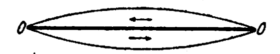


Abb. 515. Stromverteilung am geradlinigen Oszillator.

Die Schwingungsvorgänge am geradlinigen Leiter hat M. Abraham (Wied. Ann. Bd. 66, 1898, S. 435 ff.) umfassend beschrieben. Die isolierten Enden sind stromlos (Abb. 514 u. 515); in der Mitte pulsiert maximaler Strom. Die Mitte ist spannungsfrei, an den Enden treten die höchsten Spannungen auf. Strom und Spannung sind sinusförmig verteilt. Die Geschwindigkeit, mit der sich die elektromagnetischen Felder am Leiter ausbreiten, ist nahe gleich der Lichtgeschwindigkeit; darum ist die Länge des schwingenden geradlinigen Leiters gleich der halben Wellenlänge.

Außer der Grundschwingung treten am offenen Gebilde auch Oberschwingungen auf; diese sind im Falle des einfachen geradlinigen Leiters harmonisch, bei komplizierteren Gebilden unharmonisch.

(929) Strahlung. Entsprechend der Form des offenen Schwingungskreises treten nicht nur im Inneren eines Kondensators und einer Spule elektrische und magnetische Kräfte auf, sondern es wird der Raum in der Umgebung elektrisiert

und magnetisiert. Dabei kommt folgende Erscheinung zustande: Wenn z. B. ein Magnetfeld verschwindet, so bildet es nicht nur rückwärts im Leiter elektromotorische Kräfte, die den Schwingungsvorgang ebenso fortsetzen wie beim geschlossenen Schwingungskreis, sondern es ruft auch im Raume auf der vom Leiter abgewandten Seite elektrische Felder hervor, und diese Felder sind weit stärker als die von statischen Ladungen erzeugten. Sie magnetisieren in der nächsten Schwingungsphase den Raum auf der vom schwingenden Draht abgewandten Seite und bilden so einen Ausbreitungsvorgang wechselnder elektromagnetischer Kräfte, der eine fortschreitende elektromagnetische Welle darstellt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist dabei der Lichtgeschwindigkeit gleich, $3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Die Feldstärken nehmen mit der ersten Potenz der Entfernung ab.

Die experimentelle Erforschung sehr kleiner Wellen von der ungefähren Frequenz $\omega = 10^{10}/2\pi$ s, sowie die Beschreibung der Wellen, die ein schwingender Doppelpol hervorruft, rührt von H. Hertz her (Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, 1892).

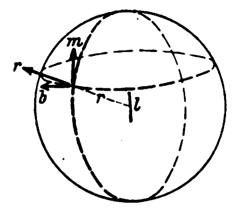


Abb. 516. Kraftkomponenten eines Senders.

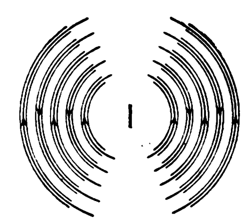


Abb. 517. Elektr. Kräfte in der Meridianebene eines Senders.

Hertz hat die elektrische Kraft $\mathfrak{E}$ und die magnetische $\mathfrak{H}$ berechnet, die ein Leiter von der Länge l in einem fernen Punkt zur Zeit t hervorruft, wenn ein Strom mit der Kreisfrequenz ω und der Amplitude I auf ihm oszilliert. Ist r der Abstand des Aufpunktes vom Sender (Abb. 516), (lr) der Winkel, den der Sender mit dem Leitstrahl bildet, und bezeichnen die Indizes r, m und b die Kraftkomponenten von $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ nach dem Radius, dem Längengrad und dem Breitengrad einer Kugel, die um den Sender durch den Aufpunkt beschrieben ist, und deren Pole in der Verlängerung des Senders liegen, so ist:

$$\mathfrak{H}_r = 0, \qquad \mathfrak{E}_r = 0,$$

$$\mathfrak{H}_m = 0, \qquad \mathfrak{E}_m = \frac{I \cdot l \cdot \omega}{r} \cdot \sin(lr) \cdot \cos\omega\left(t - \frac{r}{c}\right),$$

$$\mathfrak{H}_b = \frac{I \cdot l \cdot \omega}{r \cdot c} \cdot \sin(lr) \cdot \cos\omega\left(t - \frac{r}{c}\right), \qquad \mathfrak{E}_b = 0.$$

In der Richtung des Leitstrahls treten also weder elektrische noch magnetische Kräfte auf. Die elektrische Kraft verläuft in den Längengraden, die magnetische in den Breitengraden. Beide Kräfte sind an jeder Stelle nach Größe und Phase gleich. Im Äquator haben sie den größten Wert, an den Polen verschwinden sie. Vgl. W. König, Drudes Physik des Äthers, 1912, Kap. IX, und F. Breisig, Theoretische Telegr., 1910, S. 393 ff.

Abb. 517 zeigt den Verlauf der elektrischen Kräfte in einer Meridianebene, Abb. 518 die magnetischen Kräfte in der Äquatorebene für einen Moment t. Zwei Stellen gleicher Phasen haben den Abstand $r_1 - r_2 = 2\pi c/\omega = \lambda$.

In der drahtlosen Telegraphie bildet sich nur die obere Hälfte der Kugelwellen in der Atmosphäre aus. Die Erde ist ein guter Leiter, in dem keine starken elektrischen Felder bestehen. Statt dessen treten an der Erdoberfläche, auf der

die elektrischen Felder senkrecht stehen, wechselnde Ladungen auf (Abb. 519), die sich kreisförmig mit Lichtgeschwindigkeit über die Erdoberfläche ausbreiten und damit hochfrequente Wechselströme darstellen, die vom Sender nach allen Seiten radial in der Erdoberfläche fortschreiten.

Die Ausstrahlung der elektromagnetischen Felder verursacht, daß die Schwingungsamplitude im Sender, sofern ihm nicht beständig Energie nachgeliefert wird, abklingt, ebenso als ob ein dämpfender Widerstand eingeschaltet wäre. Man trägt diesem Abklingen durch den Strahlungswiderstand Rechnung; er beträgt für einen geraden Draht von der Länge $1/2\,\lambda$ 146,4 Ω (über den ganzen Draht gleichmäßig verteilt gedacht), für einen Sender von der Länge l um so genauer $80\,\pi^2 (l/\lambda)^2\,\Omega$, je kleiner l gegenüber λ ist.

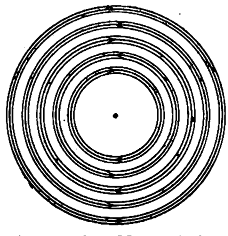


Abb. 518. Magnetische Kräfte in der Äquatorlinie eines Senders.

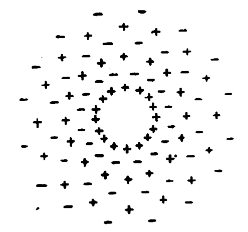


Abb. 519. Ladungen auf der Erde.

Beiträge zur Strahlung können alle diejenigen Teile eines offenen Schwingungskreises liefern, in denen Abweichungen vom quasistationären Stromverlauf stattfinden, in denen also der Strom während einer Phase dem von ihm selbst an derselben Stelle erzeugten elektrischen Feld entgegenfließen muß. Indessen wird die Strahlung nur dann wirksam, wenn sie nicht, wie z. B. bei Spulen oder Paralleldrahtleitungen, durch ein benachbartes Leiterstück von entgegengesetztem Schwingungszustand aufgehoben wird.

Funkentelegraphische Sender.

(930) Systeme mit reinen Funken. Der Primärkreis (Abb. 520) besteht aus einem großen Kondensator (Leydener Flaschen, Glasplattenkondensatoren in Öl), einer Spule und einer Funkenstrecke. Der Antennenkreis wird abgestimmt und durch magnetische oder direkte Koppelung erregt. Er besteht aus dem Luftleiter, aus Spulen (Abstimm-, Koppelungs- und Verlängerungsspule genannt) und unter Umständen auch Kondensatoren (Verkürzungskondensatoren genannt), sowie aus einer Erdverbindung, die auch durch ein isoliertes Drahtgebilde (Gegenantenne genannt) ersetzt werden kann.

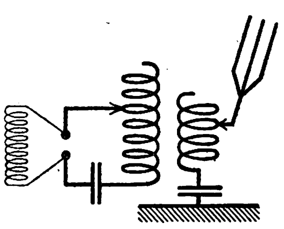


Abb. 520. Schwingungskreis, mit Funken erregt.

Je nach den Dämpfungsgrößen werden die Kreise mit 3—6% gekoppelt, so daß ein Wellenmesser noch keine getrennten Koppelungswellen erkennen läßt. Um verschiedene Wellenlängen einstellen zu können, sieht man mehrere Kapazitätsstufen vor (Grobabstimmung) und bildet die Spulen so aus, daß ihre Selbstinduktivität stetig verändert werden kann (Feinabstimmung); zu dem Zweck erhalten die Spulen entweder Schiebe ontakte, oder ein Teil der Windungen wird beweglich gemacht.

Wirksame Funken und damit ein guter Wirkungsgrad der ganzen Anlage sind an zwei Bedingungen geknüpft: erstens muß die Funkenstrecke während des Ladevorgangs nichtleitend sein; dies ist von selbst der Fall, wenn man nicht mehr als 50 Funken in einer Sekunde bildet, also langsamen Wechselstrom (bei kleinen Leistungen auch unterbrochenen Gleichstrom) zur Funkenspeisung verwendet und außerdem die Leistung nicht über 1 kW steigert; bei größeren Leistungen wird die Funkenstrecke durch einen Luftstrom ausgeblasen. Zweitens muß während der Dauer des Schwingungsvorgangs, solange also die Funkenstrecke leitet, die Ladeleitung stromlos sein. Dies wird am vollkommensten durch Anwendung des Resonanztransformators erreicht (G. Seibt, ETZ 1904, S. 277).

Nach diesem ursprünglichen System wurden Antennenschwingungen mit dem ungefähren Dekrement 0,1 hergestellt. Die Anwendung des Systems ist begrenzt durch die hohen momentanen Spannungen, die besonders in der Antenne schwer zu isolieren sind; doch sind Stationen bis zu 50 kW Maschinenleistung gebaut worden.

(931) Poulsensystem (ETZ 1906, S. 1040). Der Poulsengenerator verwendet statt der mit Wechselstrom gespeisten Funkenstrecke einen mit Gleichstrom gespeisten Flammenbogen. Dieser vermag im Schwingungskreise (Abb. 521) Schwingungen zu unterhalten, weil er anders als ein Ohmscher Widerstand eine fallende Charakteristik besitzt; d. h. mit wachsendem Strom sinkt die Spannung am Flammenbogen, so wie es auch der Schwingungsvorgang erfordert (85). Indessen ist die Flammenbogenspannung nicht nur von dem gleichzeitigen Strom abhängig, sondern auch noch von dem unmittelbar vorher vorhandenen Strom; darum hinkt die Stromspannungsabhängigkeit bei rasch verlaufenden Vorgängen etwas nach, und tritt hindernd die Lichtbogenhysterese auf (H. Th. Simon, Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 1, 1907, S. 16ff.). Ihre Wirkung wird vermindert durch Kühlung der positiven Elektrode, für die man gut leitendes Material (Kupfer) verwendet und besondere Wasserkühlung, sowie durch Einbetten des Flammenbogens in ein die Wärme gut leitendes Gas (Wasserstoff, Leuchtgas).

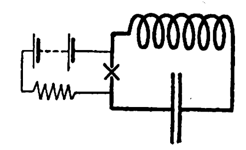


Abb. 521. Schwingungskreis, mit Flammenbogen erregt.

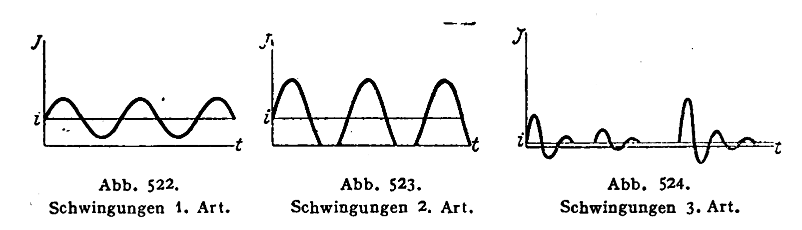


Abb. 522. Schwingungen 1. Art.

Abb. 523. Schwingungen 2. Art.

Abb. 524. Schwingungen 3. Art.

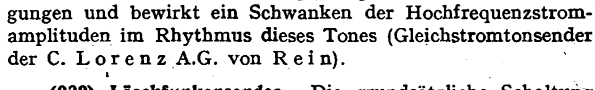
Bei reinen Flammenbogenschwingungen ist der Strom I im Schwingungskreise stets kleiner als der Speisestrom i (Abb. 522) und verläuft sinusförmig; doch lassen sich die Schwingungen nur mit kleiner Leistung herstellen, wenig über 100 W. Größere Schwingungsleistungen erzielt man nach dem Vorgang von Poulsen, wenn man Drosselspulen in die Speiseleitung legt und die Flammenbogen in ein transversales Magnetfeld einbaut. Die erzeugten Schwingungen sind dann nicht mehr sinusförmig, sondern es treten Oberschwingungen auf; die Frequenz der Grundschwingung stimmt nicht mehr genau mit der Eigenfrequenz des Kreises überein.

Barkhausen (Problem der Schwingungserzeugung, Leipzig 1907) ordnet diese komplizierten Vorgänge nach drei Typen, den Schwingungen 1., 2. und

3. Art. Die letzteren werden vielfach Partialentladungen genannt und haben den Charakter von Funkenschwingungen (Abb. 524).

Die Schwingungen des Poulsengenerators stehen den Schwingungen 2. Art (Abb. 523) wohl am nächsten. Man spricht dabei von einem ungedämpften System, weil die Schwingungsamplitude konstant bleibt. Die Anwendung eines gekoppelten Systems ist dabei nicht erforderlich; vorteilhaft ist die sogenannte Schwungradschaltung von Scheller und Hahnemann (Abb. 525).

Schaltet man dem Flammenbogen einen zweiten Schwingungskreis parallel, dessen Frequenz im Gebiet der hörbaren Töne liegt, so gerät auch er in Schwingungen und bewirkt ein Schwanken der Hochfrequenzstromamplituden im Rhythmus dieses Tones (Gleichstromtonsender der C. Lorenz A.G. von Rein).



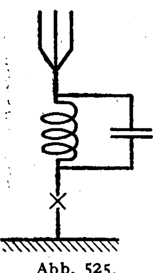


Abb. 525. Schwungradschaltung.

(932) Löschfunkensender. Die grundsätzliche Schaltung ist dieselbe wie bei reinen Funken (Abb. 520). Doch werden Funken verwendet, die schon nach ungefähr 0,0001 s erlöschen. Diese Eigenschaft hat M. Wien (Phys. Ztschr. Bd. 7, 1906, S. 871 und Bd. 9, 1908, S. 49) an kleinen Funkenstrecken von wenigen Zehntel Millimetern Länge entdeckt. E. v. Lepel hat derartige Funkenstrecken vorwiegend mit Gleichstromspeisung verwendet.

Für größere Leistungen werden Serien (bis zu 100) solcher Funkenstrecken verwendet; sie bestehen aus Kupfer- und Silberplatten, die durch Glimmerringe isoliert werden (Abb. 526). Das rasche Erlöschen der Funkenstrecke bringt den großen Vorteil mit sich, daß man sehr viele Funken in der Sekunde verwenden kann. Dieser Vorteil wird bei dem System der tönenden Löschfunken benutzt, das in erster Linie von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie durchgebildet worden ist. Es werden 600—1000 Funken in der Sekunde gebildet; dadurch wird erreicht, daß bei Hörempfang auf der Empfangseite musikalische Töne wahrgenommen werden, ein Vorteil, der dazu geführt hat, den Schreibempfang aufzugeben.

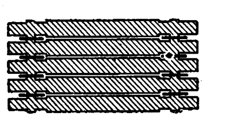


Abb. 526. Löschfunkenstrecke.

Da die Löschfunkenstrecke sehr rasch ihre Leitfähigkeit verliert, so scheidet der Primärkreis nach wenigen Schwingungen aus und der Antennenkreis schwingt mit seiner Eigenfrequenz und Eigendämpfung weiter. Man nennt diese Erregungsweise, bei der keine Koppelungswellen auftreten, Stoßerregung, und nutzt sie aus, indem man feste Koppelungen (etwa 20%) verwendet, so daß die Schwingungsenergie besonders rasch aus dem Primärkreis verschwindet und dieser keine Verlustdämpfung mehr verursachen kann.

Die rasche Funkenfolge wird dadurch erreicht, daß man zur Speisung des Senders Wechselstrom von ungefähr 500 Per/s verwendet; bei richtiger Maschinenerregung springt dann bei jedem Wechsel ein Funke über. Ist F die Funkenspannung jeder einzelnen Funkenstrecke in einer Serie von f Funkenstrecken, n die Zahl der Funken in 1 s und C die Kapazität des Primärkreiskondensators, so stellt seine n-malige Aufladung auf die Spannung $f \cdot F$ eine Leistung von der Größe $\frac{n}{2} \cdot C \cdot f^2 \cdot F^2$ dar. Bei den Stationen von Telefunken ist z. B. ungefähr $n = 1000$, $F = 1000\ \mathrm{V} = \frac{10}{3}\ \mathrm{g}^{1/2}\,\mathrm{cm}^{1/2}\,\mathrm{s}^{-1}$, mithin die vom Primärkreise aufgenommene Leistung:

$$\frac{n}{2} \cdot C \cdot f^2 \cdot F^2 = \frac{f^2}{18} \cdot C_{(\mathrm{cm})} \cdot 10^{-5} \text{ Kilowatt,}$$

wobei $C_{(\mathrm{cm})}$ die Maßzahl der Kondensatorkapazität in cm ist.

Die Löschwirkung beruht zum Teil auf der starken Abkühlung, welche die kleinen Funken zwischen den Metallplatten erfahren, zum Teil auf dem Kathodengefälle, das an den Elektroden überwunden werden muß und bei hoher Funkenzahl den Stromdurchgang sehr bald verriegelt. Die Wolframfunkenstrecke von H. Boas (Verh. Phys. Ges. 13. Jhrg. 1911, S. 527ff., 15. Jhrg. 1913, S. 1130ff.) hat einen Elektrodenabstand von wenigen Hundertstel-Millimetern und soviele Elemente, daß die Entladespannung wenig höher als das Kathodengefälle ist; darum liefert sie eine besonders vollkommene Stoßerregung auch bei den festesten Koppelungen.

Außer bei den tönenden Löschfunken wird auch bei einigen anderen Systemen von der Stoßerregung Gebrauch gemacht. Hierher gehören Marconis tönende Großstationssender mit rotierender Funkenstrecke (Abb. 527). Eine Hochspannungsbatterie (11 000 V) lädt einen Kondensator ($^1/_2\,\mu$F). In den Speiseleitungen liegen starke Drosselspulen, die eine Spannungsüberhöhung (auf 17 kV) am Kondensator bewirken. Sobald diese erreicht ist, setzt zwischen den Elektroden E (langsam rotierende Scheiben) eine Entladung über die Zapfen Z ein, die eine rasch rotierende Scheibe zwischen ihnen hindurchführt. Sie wird alsbald wieder durch die Bewegung der Zapfen unterbrochen; die einsetzende Schwingung ist inzwischen auf die gekoppelte Antenne übertragen, und der Ladevorgang wiederholt sich, während das nächste Zapfenpaar sich den Elektroden nähert.

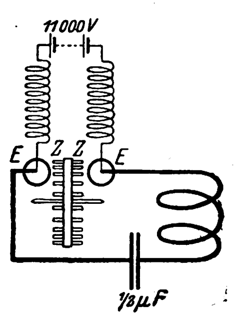


Abb. 527. Marconis rotierende Funkenstrecke.

(933) Hochfrequenzmaschinen. Durch weitgehende Polteilung und durch Steigerung der Tourenzahl kann man mit eisenarmierten Wechselstrommaschinen Frequenzen von 10 000 Per/s noch gut erreichen.

In der Hochfrequenzmaschine von Goldschmidt wird die Frequenz weiter nach folgendem Prinzip erhöht: Der Stator wird mit Gleichstrom gespeist und erzeugt daher im Rotor eine Wechselspannung von 10 000 Per/s. Der Rotor trägt eine Wickelung, die einem Schwingungskreise von dieser Frequenz angehört, so daß in ihr 10 000-periodiger Wechselstrom schwingt. Dieser erregt im Stator Wechselspannung von 20 000 Per/s, die in einem hierauf abgestimmten Kreise Wechselstrom von dieser doppelten Periode erzeugt und damit im Rotor Wechselspannung von 30 000 Per/s; und in einer vierten Stufe werden nochmals 10 000 Perioden hinzugefügt, also 40 000 Per/s erreicht, das ist eine Welle von 7,5 km Länge.

Die Hochfrequenzmaschine der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie verdoppelt die Maschinenfrequenz nach folgendem Verfahren: Der Strom von 10 000 Per/s wird in einen Transformator geleitet, der eine von Gleichstrom durchflossene Wickelung trägt. Die Induktion des Eisenkernes sinkt dann während einer Halbperiode vom Höchstwert auf Null und steigt wieder auf den Höchstwert; sie erzeugt dabei in einer dritten Wickelung eine doppelt so rasch wechselnde Spannung. In einem zweiten, gleichen Transformator wird die andere Halbwelle auf doppelte Frequenz transformiert und dann an den Enden der beiden in Reihe geschalteten Transformatoren Wechselspannung der doppelten Frequenz abgenommen (20 000 Per/s) und einem abgestimmten Kreis zugeführt. Mit einer zweiten Transformation erzielt man dann die Frequenz 40 000, in einer dritten Stufe 80 000 Per/s.

Die Hochfrequenzmaschinen liefern kontinuierliche, nahezu sinusförmige Schwingungen. Sie erfordern genaue Konstanz der Tourenzahl der Wechselstrommaschine, damit die stufenweise abgestimmten Schwingungskreise ansprechen. Sie gestatten, sehr große Schwingungsleistungen (mehrere 100 kW) herzustellen und sind darum für Großstationen geeignet; für kleine Stationen kommen sie schon wegen ihrer großen Wellenlänge weniger in Frage.

(934) Röhrensender. (A. Meißner, ETZ 1919, Heft 7 u. 8; (81), S. 62). Eine hochevakuierte Senderröhre enthält als Kathode einen Faden aus schwer schmelzbarem Metall, der durch eine Hilfsbatterie zum Glühen gebracht wird, die sogenannte Glühkathode (*K* in Abb. 528); als Anode *A* dient ein Tantalblech. Diese Elektroden sind an eine Hochspannungsquelle (rund 100 bis zu mehreren tausend Volt) mit parallelgeschaltetem Blockkondensator angeschlossen. In der Bahn dieses Stromkreises, des Anodenstroms, liegt ein Schwingungskreis *C L*.

Zwischen Anode und Kathode ist sieb- oder gitterartig ein feiner Draht gespannt, das sogenannte Gitter *G*; wird es geladen, so entsteht ein elektrisches Feld zwischen Gitter und Kathode, das die vom Glühfaden ausgesandten Elektronen je nach seinem Vorzeichen beschleunigt oder verzögert und damit den Anodenstrom verstärkt oder schwächt. Bereits durch wenige Volt Spannungsänderung am Gitter kann man im Anodenstrom Schwankungen von einigen Milliampere hervorrufen.

Diese Verstärkerwirkung wird benutzt, um eine Schwingung von beliebig kleiner Amplitude, wie sie schon beim Einschalten des Stromes im Kreise *C L* verursacht wird, selbsttätig soweit zu verstärken, bis in der Röhre Sättigungsstrom fließt, d. h. bis alle Elektronen, welche die Glühkathode aussendet, an die Anode gelangen. Hierzu dient die Rückkoppelung, bei der die Gitterspannung durch die Schwingung selbst gesteuert wird. Zu dem Zweck kann man zwischen Gitter und Kathode einen auf *C L* abgestimmten und mit *C L* gekoppelten Schwingungskreis einschalten. Außerdem gibt es eine große Anzahl wirksamer Schaltungen mit direkter Verbindung zwischen Gitter und Anodenkreis und ohne einen abgestimmten Gitterkreis, die sämtlich den Zweck haben, dem Gitter Wechselspannung von geeigneter Größe und Phase zuzuführen.

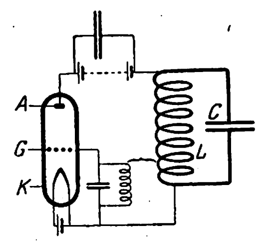


Abb. 528. Röhrensender.

Im Schwingungskreise treten nahezu sinusförmige Schwingungen von großer Gleichmäßigkeit auf. Der Schwingungskreis *C L* wird entweder selbst als Antennenkreis ausgebildet oder er ist geschlossen und mit dem Antennenkreise gekoppelt.

Die größten bisher gebauten Röhren liefern einige Kilowatt Schwingungsleistung. Die Vorteile dieses neuesten Sendesystems beruhen in der Sinusform und der Phasen- und Amplitudenkonstanz der erzeugten Schwingungen. Diese haben die Konstruktion von Empfangsmitteln ermöglicht, die an Empfindlichkeit, Störungsfreiheit und Gleichmäßigkeit allen älteren überlegen sind (943, 944).

(935) Drahtlose Telephonie. Die drahtlose Telephonie setzt Sendesysteme voraus, die Schwingungen von gleichbleibender Amplitude auszusenden gestatten. Sie gelingt darum mit dem Poulsensystem, den Hochfrequenzmaschinen und den Röhrensendern. Während beim Telegraphieren ein Stromkreis des Senders getastet wird, tritt beim Telephonieren an Stelle der Taste das Mikrophon, das die Amplitude der Schwingungen im Rhythmus der Sprechströme steuert; zu diesem Zwecke wird es z. B. beim Röhrensender in den Gitterkreis geschaltet. Bei starken Sendern bereitet es Schwierigkeiten, Mikrophone zu bauen, die eine genügende Belastung vertragen. Außerdem sind die Gegensprecheinrichtungen im drahtlosen Betrieb noch wenig entwickelt, und die Gefahr, daß Unbefugte die Gespräche ablauschen, liegt stets vor. Darum bürgert sich die drahtlose Telephonie schwer ein. Zudem ist der Bedarf nicht groß angesichts der hohen Entwicklung und weiten Verbreitung der Leitungstelephonie und der drahtlosen Telegraphie. (K. Markau, Die Telephonie ohne Draht. Vieweg, 1912.)

(936) Kraftquellen. Je nach dem System und der Verwendung einer Sendestation werden mannigfache Kraftquellen benutzt.

Ortsfeste Stationen verwenden Sammlerbatterien oder Netzanschlüsse oder Dynamomaschinen, die mit eigenen Wärmemaschinen angetrieben werden; erforderlichenfalls werden Umformeraggregate oder Gleichrichter verwendet, um die für das System erforderliche Stromart und Spannung herzustellen.

Die Sender von Schiffsstationen werden aus dem Starkstromnetz des Schiffes gespeist, meist ist auch noch eine Sammlerbatterie für Notfälle vorgesehen.

Die Stationen der Luftfahrzeuge erhalten Dynamomaschinen, die entweder mechanisch von den Motoren mitangetrieben werden, oder bei kleinen Stationen durch einen besonderen Propeller.

Für fahrbare Stationen benutzt man Benzindynamos (R. Bosch, Stuttgart).

(937) Konstruktionseinzelheiten. Als Kondensatoren für große Belastungen dienen Leydener Flaschen oder Glasplattenkondensatoren, die zur Vermeidung von Randentladungen in Öl gebettet werden können. Als Spulen werden Zylinderspulen oder Flachspulen (Spiralen) verwendet; sie werden besonders als Abstimmorgane benutzt und zu dem Zweck teils stufenweise unterteilt, teils durch Bewegung einzelner Spulenstücke gegeneinander für stetig veränderliche Selbstinduktivität eingerichtet; man nennt sie dann Variometer, und zwar je nach ihrer Verwendungsweise Primärkreisvariometer oder Antennenvariometer. Vielfach werden die Spulen zur Vermeidung von Wirbelströmen und Skineffekt aus Litzen hergestellt (99, 3 u. 4). Zur Erhöhung der Belastungsfähigkeit werden sie auch in Öl gebettet.

Taste. Getastet wird entweder der den Sender speisende Strom oder der Speisestrom des Transformators oder die Maschinenerregung, bei ungedämpftem System manchmal auch ein Verstimmungsorgan in der Antenne, beim Röhrensender auch der Gitterkreis. Leistungen von weniger als 1 kW können mit einer Handtaste gesteuert werden, für größere Leistungen sind elektromagnetische Tastrelais erforderlich.

Sicherungen. Die Maschinen werden durch Hochspannungssicherungen, Erdverbindungen und Drosselspulen gegen schädliche Spannungen geschützt, die vom Sender leicht in benachbarten Konstruktionsteilen erregt werden.

Zur Überwachung des Senders dienen Meßinstrumente, vor allem ein Hitzdrahtamperemeter im Antennenkreise, ferner Wellenmesser, Detektorkreise zur Prüfung des Tones beim tönenden Senden, und umlaufende Leuchtröhren (F. Kiebitz, ETZ 1909, S. 23) zum Prüfen der Regelmäßigkeit der Schwingungen.

Ein Umschaltwerk schaltet sämtliche Empfängerteile ab, sobald die Sendeapparatur eingeschaltet wird, und blockiert den Sender, wenn der Empfänger eingeschaltet wird.

(938) Antennen. Der Antennenkreis besitzt außer der Antenne und den Abstimmitteln entweder eine Erdleitung oder eine Gegenantenne. Im ersten Falle schwingt er in der Form einer Viertelwelle, im zweiten als halbe Welle.

Schiffsstationen benutzen stets den Schiffskörper als Erdleitung. Für ortsfeste Stationen baut man Erdanschlüsse, indem man Metallplatten und radial verzweigte Drahtgebilde in der Umgebung der Station im feuchten Boden vergräbt. Auf schlecht leitendem Boden können auch isolierte Drähte in geringer Höhe radial um die Station ausgespannt und als Gegenantenne verwendet werden. Fahrbare Stationen werden stets mit isolierten Gegenantennen ausgerüstet. Bei Luftfahrzeugen dienen die Metallteile des Fahrzeugs als Gegenantenne zu einer herabhängenden Antenne; diese pflegt bei Flugzeugen ein einfacher Draht zu sein, bei Luftschiffen hat sie eine ankerähnliche Form.

Man gibt der Antenne eine möglichst offene Form; dies wird durch Abmessungen erreicht, die gegenüber der Betriebswelle nicht allzu klein sind. Je nach der Gelegenheit, Türme oder Masten zu benutzen, verwendet man sehr verschiedene

Antennenformen. Auf Schiffen ist man aus statischen Gründen darauf angewiesen, T-förmige Antennengebilde zu bauen; fahrbare Stationen verwenden vielfach einen Mast mit einer Schirmantenne. Bei festen Stationen kommen daneben Formen vor, die einem Trichter, Zylinder oder Fächer ähnlich sind, oder langgestreckte Gebilde; falls keine Türme oder Masten zur Verfügung stehen, verwendet man Erdantennen, d. h. lange wagerechte Drähte, die isoliert auf Stützen befestigt oder auf die Erde gelegt werden (F. Kiebitz, Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 6, 1913, S. 554).

Wichtig für die Konstruktion einer Antenne ist allein, daß sie einen Strahlungswiderstand R_s besitzt, der neben den Verlustwiderständen R_v möglichst beträchtlich ist, damit der Strahlungswirkungsgrad, d. i. das Verhältnis der von der Antenne ausgestrahlten zu der ihr zugeführten Leistung $\frac{R_s}{R_s + R_v}$ numerisch möglichst günstig wird. Die Form der Antenne, ihre Kapazität und ihre Selbstinduktion sind von untergeordneter Bedeutung.

Der Strahlungswirkungsgrad wird um so größer, je kleiner die Verluste sind. Diese werden hervorgerufen durch den Erdungswiderstand, durch Isolationsmängel, durch Ohmschen Widerstand der Antennendrähte und der Abstimmmittel, durch dielektrische Verluste im Kondensator, durch Wirbelströme in metallischen Konstruktionsteilen und im Erdreich, und durch Magnetisierungswärme in Eisenkonstruktionen. Zum Teil sind sie unvermeidlich.

Leider kann man durch Dämpfungsmessungen den Strahlungswiderstand nicht vom Verlustwiderstand trennen. Doch läßt sich für einfache Antennenformen der Strahlungswiderstand berechnen. Er beträgt für eine Schirm- oder T-Antenne von der wirksamen Höhe H:

$$R_s = 160\pi^2 \cdot \left(\frac{H}{\lambda}\right)^2 \text{ Ohm},$$

für eine Antenne von der Länge L, die in der Höhe H wagerecht gespannt ist:

$$R_s = 25000 \cdot \left(\frac{HL}{\lambda^2}\right)^2 \text{ Ohm}$$

(vgl. Martens, Phys. Grundl. d. Elektrotechnik II, Art. 168).

Als Antennenmaterial werden vielfach Bronzelitzen verwendet. Elektrisch günstiger sind massive Drähte. Isoliert werden die Antennen mit Porzellankörpern oder mit Ketten von Porzellankörpern, sog. Eierketten. Zur Verhinderung von Sprühentladungen werden alle Kanten und Spitzen vermieden und unter Umständen besondere Sprühschutzkörper benutzt (Metallkugeln und gut gerundete Blechhüllen).

Funkentelegraphische Empfänger.

(939) Antennenkreis. Zum Empfang dienen meist dieselben Antennen wie zum Senden. In ihnen wird durch das einfallende elektromagnetische Wechselfeld ein Strom erzeugt, der bei Abstimmung einen Höchstwert erreicht. Die Grobabstimmung geschieht durch stufenweise unterteilte oder auswechselbare Spulen, die Feinabstimmung durch Drehkondensatoren, weil sich diese für die geringe Beanspruchung durch die schwachen Empfängerströme ohne großen Verlust und mit großer Genauigkeit herstellen lassen, vgl. G. Seibt, ETZ Bd. 35, 1914, S. 531.

Der Abstimmkondensator liegt entweder in Reihe mit der Antenne (Abb. 529); dann verkleinert er die Gesamtkapazität im Antennenkreise, vergrößert also die Eigenfrequenz und verkürzt die Welle. Oder er liegt parallel zur Antenne und vergrößert die Gesamtkapazität, verlängert also die Welle (Abb. 530).

Wird die Empfangsantenne unter dem Einfluß der einfallenden Wellen in Schwingungen versetzt, so strahlt sie ihrerseits Wellen aus, welche die einfallenden

Felder kompensieren. Je größer ihr Strahlungsvermögen ist, um so besser ist sie hierzu geeignet, aus einem um so größeren Raume absorbiert sie also die ankommenden Wellen.

Fließt in einer Sendeantenne von der wirksamen Höhe H_1 der Strom I_1 bei einer Wellenlänge λ_1, so wird nach H. Barkhausen (Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 5, 1912, S. 261) in der Entfernung r in einer abgestimmten Empfangsantenne von der wirksamen Höhe H_2 und dem Dämpfungswiderstand R Ohm ein Strom I_2 erzeugt von der Größe:

$$I_2 = \frac{377}{R} \cdot I_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2}{r \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2}};$$

dabei sind δ_1 und δ_2 die Dämpfungsdekremente der Sende- und Empfangsantenne.

In Wirklichkeit wird dieser Strom nicht ganz erreicht, weil die Wellen infolge der ungenügenden Leitfähigkeit der Erdoberfläche bei ihrer Ausbreitung Verluste erfahren, die bei dieser Formel nicht in Rechnung gesetzt sind; Ansätze zu ihrer Berechnung sind entwickelt worden von A. Sommerfeld (Ann. Phys. Bd. 28, 1909, S. 665 ff.), M. Reich (Phys. Ztschr. Bd. 14, 1913, S. 934), L. W. Austin (zuletzt Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 12, 1917, S. 185).

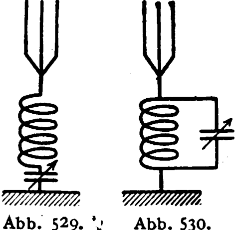


Abb. 529. Verkürzungskondensator. Abb. 530. Verlängerungskondensator.

Während für die Stromstärke und die Energieverhältnisse in den Antennen die Dämpfungswiderstände maßgebend sind, wird die Abstimmschärfe und damit die Störungsfreiheit durch das Dämpfungsdekrement

$$\delta = \pi \cdot R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

bestimmt. Darum ist die Störung durch fremde Wellen um so geringer, je kleiner man den Dämpfungswiderstand R und die Kapazität C, und je größer man die Selbstinduktion L des Antennenkreises macht.

(940) Zwischenkreise. Diesen Bedingungen kann man nicht immer gerecht werden, ohne die Antenne gleichzeitig für ihren Sendezweck ungeeignet zu machen. Auch sind der Erzielung kleiner Dekremente mit diesen Mitteln Grenzen gesetzt; denn der Dämpfungswiderstand enthält neben den schädlichen Verlusten auch den nützlichen Strahlungswiderstand, und die Selbstinduktivität kann man nicht beliebig vergrößern, ohne schädliche Leitungswiderstände in den Spulen in Kauf zu nehmen. Außerdem erfährt die Schwingung im Antennenkreise eine neue Dämpfung, sobald Mittel benutzt werden, um sie wahrnehmbar zu machen.

Darum ist häufig zur Störungsbefreiung ein besonderer Zwischenkreis nützlich, der lose mit dem Antennenkreise gekoppelt wird (Abb. 531). Unter Umständen werden sogar mehrere Zwischenkreise verwendet. Dadurch wird zwar die Empfängerapparatur kompliziert, aber man kann dafür auch mit ungünstigen Antennen gute Störungsfreiheit erreichen. Man kann dann sogar kleine Wellen im Zwischenkreise scharf abstimmen, die im Antennenkreise überhaupt nicht oder nur als unharmonische Oberschwingungen abgestimmt werden können.

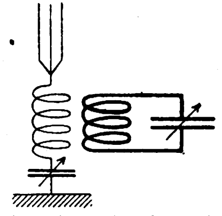


Abb. 531. Zwischenkreis.

Der Zwischenkreis wird ebenso wie der Antennenkreis auf die ankommenden Wellen abgestimmt. Die Koppelung mit der Antenne muß lose sein, weil sonst zwei Frequenzen auftreten, mithin die Störungsfreiheit herabgesetzt wird. Je kleiner die Koppelung ist, um so mehr tritt die Amplitude der Eigenschwingung des Zwischenkreises gegenüber allen übrigen in der Antenne etwa erregten Schwin-

gungen hervor. Vgl. die Formel für das Stromintegral (926). Praktisch kann man darum in vielen Fällen störende Stationen unhörbar machen, ohne daß die gesuchte Station merklich leiser wird.

(941) Detektoren. Um die schwachen Empfangsströme wahrnehmbar zu machen, benutzt man Detektoren mannigfacher Art. Man kann sie gruppieren in solche, die auf Strom ansprechen, und solche, die durch Spannung erregt werden. In jedem Falle ist zu unterscheiden, ob der Detektor auf Momentanwerte anspricht, also sprunghaft seine Eigenschaften unter dem Einfluß der Schwingungen ändert, oder ob er Integralwerte anzeigt.

Von Detektoren, die auf momentane Spannungswerte ansprechen, hat der Kohärer oder Fritter eine große Rolle gespielt, solange das Knarrfunkensystem im Gebrauch war, das mit großen momentanen Leistungen arbeitete. Er besteht aus einem mit Metallpulver gefüllten Glasröhrchen (Abb. 532); dieses Pulver nimmt unter dem Einfluß einer kleinen Spannung plötzlich einen kleinen Widerstand an, der durch Erschütterung, Klopfen wieder auf einen hohen Wert gebracht wird. Darum ist er geeignet, wenn Wellen im Takte von Morsezeichen einfallen, ein Relais im Takte dieser Zeichen zu betätigen, das seinerseits einen Morseapparat sowie die Klopfeinrichtung für die Entfrittung in Gang setzt.

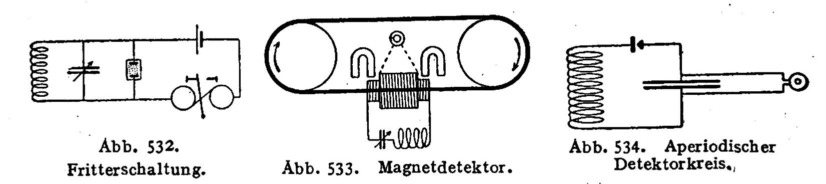


Abb. 532. Fritterschaltung. Abb. 533. Magnetdetektor. Abb. 534. Aperiodischer Detektorkreis.

Ein Detektor für momentane Stromwerte ist der Magnetdetektor von Marconi (Abb. 533). Er beruht darauf, daß die Hysterese eines magnetisierten Eisenstücks in einem rasch pulsierenden Magnetfeld plötzlich verschwindet. Er besitzt ein endloses Eisenband, das über zwei Rollen geführt wird und auf seinem Wege beständig durch zwei Magnete ummagnetisiert wird. Es läuft durch das Innere von zwei Spulen, von denen die eine den Empfangstrom führt, die andere an ein Telephon angeschlossen ist. In diesem wird dann jedesmal ein Stromstoß wahrgenommen, wenn die Empfängerspule erregt wird, also wenn auf der Sendestation ein Funke springt.

Diese Detektoren werden in abgestimmten Kreisen verwendet; der Kohärer liegt am Kondensator, der Magnetdetektor wird in die Spule eingeschaltet.

Als Detektoren, die auf Spannungsintegrale ansprechen, eignen sich die photoelektrischen Zellen (H. Behnken, Verh. Physikal. Ges. Jhrg. 16, 1914, S. 668); doch werden sie in der Technik nicht verwendet.

Bei weitem am verbreitetsten sind jetzt die stromintegrierenden Detektoren. Sie liefern, wenn sie von Wechselstrom durchflossen werden, auf irgendeinem mehr oder weniger erkennbaren Wege Gleichspannung, wirken also als Gleichrichter. Darum werden sie grundsätzlich so geschaltet, daß sie Gelegenheit haben, in einem sonst schwingungsfähigen Stromkreise die Schwingung zu vernichten. Dies führt zur Konstruktion der aperiodischen Detektorkreise (F. Kiebitz, ETZ 1909, S. 225). Sie bestehen aus einer Spule, dem Detektor und einem Kondensator von wenigstens 25 m Kapazität, dem das Telephon parallel geschaltet ist (Abb. 534). Der Detektor muß dabei möglichst kapazitätsfrei angeschlossen werden.

Zu den stromintegrierenden Detektoren gehören in erster Linie die Kontaktdetektoren. Sie bestehen aus einem Stück Silizium, einem Kies oder Glanz oder anderem Mineral, das von einer Metall- oder Graphitspitze berührt wird. Die Gleichrichtwirkung wird zum Teil durch das Auftreten von Thermokräften bewirkt, zum Teil beruht sie auf elektrolytischer Polarisation. In letzterem Falle

kann man die Empfindlichkeit noch erhöhen, wenn man den Detektor durch eine geeignete Hilfspannung dauernd polarisiert. Auf rein elektrolytischer Wirkung beruht die Zelle von Schlömilch, eine sehr zart ausgeführte Polarisationszelle mit Platinelektroden in Schwefelsäure.

Auch der Ticker von Poulsen gehört zu den integrierenden Detektoren; er ist ein rasch vibrierender Kontakt zwischen Goldfedern und wurde zum Empfang der Poulsenwellen benutzt.

Ebenso wirkt der Schleifer von Telefunken ein Draht, der lose auf einer rotierenden Scheibe schleift.

Eine einfache Ventilwirkung übt der Glühlampendetektor aus (Fleming, Proc. Royal Soc. Bd. 74, 1905, S. 476). Er besteht aus einem im Vakuum weißglühenden Faden, der von einem Metallmantel umgeben ist. Der Faden sendet negative Elektronen aus, kann also nur als Kathode wirken und unterdrückt darum diejenigen Halbwellen, in denen positiver Strom vom Glühfaden zum Mantel fließen will, während er die anders gerichteten Halbwellen hindurchtreten läßt.

(942) Audionempfang. Es wird ebenso wie beim Röhrensender ein Elektronenrelais verwendet, jedoch in anderer Weise. Das System Glühkathode-Gitter wird als Glühlampendetektor benutzt und zu dem Zweck in die Strombahn des Detektorkreises gelegt (Abb. 535) Dabei liegt ein großer Widerstand (wenigstens 50 000 Ω) parallel zum Kondensator, weil sich sonst das Gitter im Betrieb mit dauernd wachsender negativer Ladung bedecken würde. Das Telephon wird in den Anodenkreis gelegt und empfängt auf diese Weise die gleichgerichteten Stromstöße in verstärkter Form.

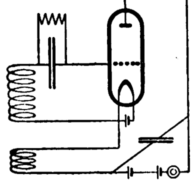


Abb. 536. Audion mit Rückkoppelung.

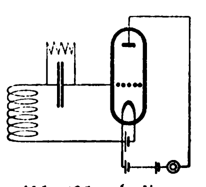


Abb. 535. Audion.

Eine weitere Vervollkommnung in der Verwendung des Elektronenrelais im Empfänger bildet der Audionempfang mit Rückkoppelung (Abb. 536); die Röhre wird dabei nicht nur als Glühlampendetektor und einfacher Lautverstärker benutzt, sondern es wird noch eine weitere Lautverstärkung nach dem Prinzip der Rückkoppelung herbeigeführt. Diese wird z. B. dadurch erreicht, daß in den Anodenkreis eine Spule gelegt wird, die auf die Spule des Gitterkreises induziert. Damit sich hierbei die Gleichstromstöße von der Frequenz der einfallenden Schwingung im Anodenkreise ausbilden können, muß parallel zur Anodenbatterie und zum Telephon noch ein Kondensator von etwa 150 m Kapazität gelegt werden, der den hochfrequenten Strömen keinen erheblichen Widerstand bietet, die für das Telephon bestimmten Gleichstromstöße aber blockiert.

Die Rückkoppelung ist dabei zunächst etwas loser als beim Röhrensender, so daß noch keine Selbsterregung von Schwingungen zustande kommt. Ihre Wirkung besteht in einer Kompensation der Dämpfungsverluste des Empfängers, so daß man beim Audionempfang mit Rückkoppelung sich dem Fall eines dämpfungslosen Empfängers beliebig nähern kann.

Der Name „Audion" stammt von L. de Forest, der zum ersten Male eine Ionenröhre als Glühlampendetektor und Lautverstärker angegeben hat.

(943) Schwebungsempfang. Wählt man beim Audionempfang die Rückkoppelung größer, so wirkt das Elektronenrelais als Sender und erzeugt, z. B. im Zwischenkreise, selbst Schwingungen. Auf dieser Erscheinung beruht eine neue Verwendung des Elektronenrelais. Man gibt der Frequenz der im Zwischenkreise erzeugten Schwingung eine kleine Differenz gegen die Frequenz der in der Antenne aufgenommenen Welle. Dann bilden sich durch Interferenz Schwebungen

aus; ihre Frequenz hat man in der Hand durch die Frequenzendifferenz zwischen der einfallenden und der selbsterregten Schwingung. Man stellt sie so ein, daß sie einem hörbaren Ton entspricht, den man alsdann im Telephon wahrnimmt. Das Beispiel einer Schaltung für Schwebungsempfang zeigt Abb. 537. Der Schwebungsempfang ist nicht an die Audionwirkung gebunden, sondern ist auch mit anderen Detektoren anwendbar. Indessen bietet für den Empfang von ungedämpften Wellen dieses Verfahren ein besonders einfaches und vollkommenes Mittel. Meist wird die überlagerte Hilfswelle in einem besonderen Kreise erzeugt (Schwebungszusatzkasten), der lose mit dem Empfänger gekoppelt ist.

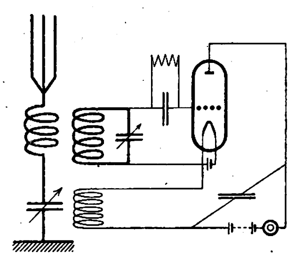


Abb. 537. Schwebungsempfang.

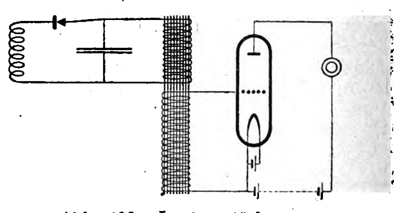


Abb. 538. Lautverstärker.

(944) Lautverstärker und Rahmenempfang. Das Elektronenrelais wird auch zur einfachen Verstärkung der Telephonströme benutzt, die beim Detektorempfang tönender Stationen oder beim Schwebungsempfang von Röhrensendern auftreten. Der Wechselstrom wird dabei durch einen kleinen Eisentransformator (Abb. 538) zunächst auf höhere Spannung transformiert, die dem Gitter zugeführt wird, und im Anodenkreise liegt das Telephon, entweder direkt oder über einem Transformator.

Die Telephonströme werden dabei ungefähr auf den achtfachen Betrag verstärkt. Meist verstärkt man sie noch ein zweites Mal, oft auch drei- und vierfach, wobei man in jeder Stufe den Anodenstrom der vorhergehenden auf höhere Spannung transformiert und dann dem Gitter der nächsten Röhre zuführt. Begrenzt wird die Zahl der Stufen dadurch, daß unvermeidliche Nebengeräusche mitverstärkt werden. Die Glühkathode der üblichen Lautverstärker braucht 6 V, die Anodenbatterie 80 V, doch werden auch Verstärkerröhren für kleinere Spannungen gebaut.

Ebenso wie der Telephonstrom kann auch die rasche Schwingung mit dem Elektronenrelais stufenweise verstärkt werden, doch erfolgt dann die Übertragung von einer Röhre auf die nächste nicht durch Eisentransformatoren, sondern entweder durch abgestimmte Kreise oder durch Abzweigung von hohen Widerständen. (G. Leithäuser, Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 14, 1919, S. 152ff.) Man bezeichnet Elektronenrelais in dieser Verwendungsweise als Hochfrequenzverstärker.

Die großen Verstärkungszahlen, die mit dem Elektronenrelais erreicht werden können (1000- bis 10000-fach), haben dazu geführt, daß man auch mit sehr kleinen Antennen noch ferne Stationen hören kann. Man kann auch auf den Bau von besonderen Luftleitern verzichten und zum Empfang große Drahtspulen von einigen Windungen benutzen, die im Zimmer aufgestellt werden können. Solche Spulen werden auch als Rahmenantennen bezeichnet. Sie besitzen eine starke Richtwirkung insofern, als sie in der Rahmenebene maximal empfangen, aus der Richtung senkrecht zum Rahmen dagegen nichts aufnehmen können.

Reichweiten, Störungen, besondere Anlagen.

(945) Normale Reichweiten. Die Reichweite ist in der Funkentelegraphie ein ebenso wichtiger wie unbestimmter Begriff. Sie hängt normalerweise ab von der Fernwirkung der Sendeanlage und der Empfindlichkeit der Empfangsanlage, außerdem aber in unberechenbarer Weise von vielen störenden Nebenumständen

Derselbe Sender besitzt eine um so größere Fernwirkung, mit je größerer Leistung er betrieben wird; denn die Energie der ausgestrahlten Wellen nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab; darum verdoppelt man die Fernwirkung, wenn man denselben Sender mit der vierfachen Leistung oder der doppelten Antennenstromstärke belastet.

Verschiedene Sender, mit derselben Leistung betrieben, würden immer dieselbe Fernwirkung ergeben, wenn sie die ganze der Hochfrequenzapparatur zugeführte Maschinenleistung als Wellen ausstrahlten. Dies ist aber nicht der Fall, sondern es treten Verluste in zwei wesentlichen Stufen auf, und zwar erstens auf dem Wege von den Speiseleitungen bis zur Antenne, also im Schwingungsgenerator. Sein Wirkungsgrad ist je nach dem Sendesystem verschieden; die neueren Systeme erreichen Wirkungsgrade von mehr als 50%. Für lange Wellen erreicht man dabei im allgemeinen eine günstigere Ausnutzung als für kurze.

Die zweite Stufe, in der Sendeverluste auftreten, liegt bei der Ausstrahlung durch die Antenne. Ihr Wirkungsgrad ist gegeben durch das Verhältnis ihres Strahlungswiderstandes, den man in einfachen Fällen berechnen kann (938), zu ihrem Gesamtdämpfungswiderstand, den man messen kann (927). Der Strahlungswiderstand einer Antenne nimmt mit dem Quadrat der Wellenlänge ab, der Gesamtwiderstand steigt indessen meistens mit zunehmender Wellenlänge infolge der unvermeidlichen Verluste, welche die Leitungswiderstände der größeren Verlängerungsspulen mit sich bringen. Darum sinkt bei einer schwach strahlenden Antenne der Strahlungswirkungsgrad und damit die Fernwirkung rasch mit steigender Wellenlänge, und es hat sich erfahrungsmäßig die Regel gebildet, daß eine Antenne die größte Reichweite ergibt, wenn sie in der Nähe ihrer Eigenschwingung betrieben wird.

Beispielsweise hat eine Schirmantenne von 25 m mittlerer Höhe bei einer Eigenwelle von 500 m Länge 4 Ω Strahlungswiderstand. Dieselbe Antenne hat bei 1000 m Wellenlänge 1 Ω, bei 2000 m Wellenlänge 0,25 Ω Strahlungswiderstand. Wird sie mit 600 W gespeist, so mißt man etwa bei 500 und 1000 m Wellenlänge 10 A Antennenstrom, bei 2000 m nur 7,75 A. Daraus ergeben sich die Gesamtwiderstände zu 6 bzw. 6 bzw. 10 Ω, mithin die Strahlungswirkungsgrade $^2/_3$ bzw. $^1/_6$ bzw. $^1/_{40}$. Bei 500 m Wellenlänge werden also von den zugeführten 600 W 400 W ausgestrahlt, bei 1000 m nur 100 W und bei 2000 m sogar nur 15 W.

Auf der Empfängerseite ist ein möglichst großer Strahlungswirkungsgrad für das Zustandekommen des Empfangsstromes ebenso wichtig wie auf der Sendeseite für die Ausstrahlung; darum wird die Reichweite durch Vergrößerung des Verhältnisses von Antennenhöhe zur Viertelwellenlänge günstig beeinflußt. Zu den Dämpfungsgrößen tritt hier die Nutzdämpfung hinzu; sie ist durch die Energieentziehung verursacht, die der Detektorkreis bedingt.

Mit der Empfindlichkeit des Detektors steigt die Reichweite; diese Empfindlichkeit ist bei einem stromintegrierenden Detektor einmal durch den Wirkungsgrad bestimmt, mit dem er den einfallenden hochfrequenten Wechselstrom in Gleichstrom verwandelt, andererseits durch die untere Schwelle, bei der er überhaupt noch anspricht. Dieser Schwellenwert ist beim Elektronenrelais außerordentlich klein. Bei Kontaktdetektoren schwankt die Empfindlichkeit sehr stark unter dem Einfluß von Überlastung durch Störungen und von Erschütterungen.

(946) Störungen. Die Reichweite wird durch viele schädliche Nebenumstände herabgesetzt, denen man nur zum Teil mit technischen Mitteln begegnen kann, zum Teil auch durch persönliche Erfahrung und Geschick der Telegraphisten.

Hierher gehört einmal die Störung durch fremde Stationen. Sie wird technisch durch scharfe Abstimmung herabgesetzt und am vollkommensten bei den Röhrensendern und -empfängern erreicht. Außerdem ist aber staatliche Regelung des Wellengebrauchs und der Sendezeiten erforderlich. Durch internationale Übereinkunft sind für den allgemeinen öffentlichen Verkehr mit Schiffen in See die Wellenlängen 300 und 600 m vorgesehen, kleinere Wellen für die Zwecke klei-

ner Spezialstationen, der Wellenbereich von 600—1600 m für Militärstationen und alle größeren Wellen für Großstationen.

Die Reichweiten werden ferner durch die Bodenbeschaffenheit beeinträchtigt; während sich die Wellen über Wasser ziemlich ungestört ausbreiten, erfahren sie über Land unberechenbare Hindernisse, so daß erheblich kleinere Reichweiten erzielt werden. Diese Hindernisse treten beim Gebrauch großer Wellen weniger stark in die Erscheinung als kleinen Wellenlängen gegenüber.

Ebenso finden durch Witterungseinflüsse Störungen statt, welche die kleinen Wellen stärker behindern als die großen. Allgemein werden bei Nacht größere Reichweiten erzielt als bei Tage, im Winter größere als im Sommer.

Sehr große Störungen treten unter atmosphärischen Einflüssen auf, die den Empfänger zum Ansprechen bringen; ihre Ursachen sind wenig erforscht; besonders stark treten sie in der heißen Jahreszeit und in den Tropen auf, so daß auch die Aufnahme lauter Zeichen oft unmöglich wird.

Ähnliche Störungen verursachen, besonders in großen Städten, elektrische Anlagen; sie sind oft so groß, daß sie auch durch scharfe Abstimmittel und geübte Hörer nicht beseitigt werden können. Sie treten um so stärker auf, je größer die Luftleiter sind, und werden durch die Lautverstärker so gut verstärkt wie die Telegraphierzeichen. Die Rahmenempfänger ermöglichen infolge ihrer kleinen Abmessungen einen verhältnismäßig ungestörten Empfang.

(947) Richtungstelegraphie. Eine ausgeprägte Richtwirkung zeigen die Rahmenantennen (944). Dieselbe Erscheinung wird auch mit Antennenpaaren erreicht (Abb. 539), d. h. mit zwei symmetrischen Antennen, die in einer Ebene aufgestellt werden und mit entgegengesetzter Phase schwingen (F. Kiebitz, Ann. Phys. Bd. 32, 1910, S. 963; Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 6, 1912, S. 1). Sie zeigen ein Maximum der Fernwirkung in der Richtung, in der sie hintereinander erscheinen, in der dazu senkrechten Richtung verschwindet die Fernwirkung.

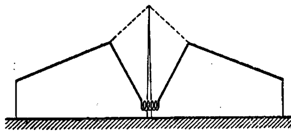


Abb. 539. Richtantennenpaar.

Hierauf beruhen fast alle Richtsende- und -empfangsanlagen. Die Richtsender werden verwendet, Zeichen zur Orientierung für Schiffe und Luftfahrzeuge zu verbreiten, die Richtempfänger zur Messung der Richtung, in der eine unbekannte Station steht, und zur Störungsbefreiung durch Einstellen in die Nullrichtung einer störenden Station.

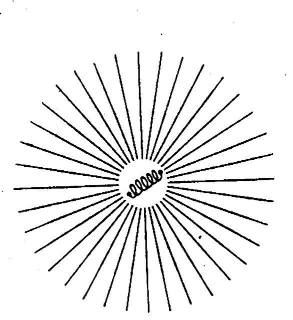


Abb. 540. Antennenstern.

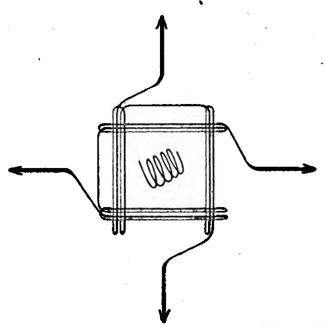


Abb. 541. Radiogoniometer.

Um viele Richtungen einstellen zu können, verwendet man entweder einen Stern von vielen Antennenpaaren (Abb. 540); dies geschieht z. B. beim Telefunkenkompaß (Jahrb. drahtl. Telegr. Bd. 6, 1912, S. 85), oder man be-

nutzt ein rechtwinkliges Kreuz von zwei Antennenpaaren in Verbindung mit dem Radiogoniometer von Bellini und Tosi. Dieses enthält zwei unter 90° gekreuzte Sende- oder Empfangsspulen (Abb. 541), an deren Enden die Antennenpaare angeschlossen sind. Im Inneren der Spulen ist drehbar die Spule des geschlossenen Kreises angebracht, der je nach seiner Stellung die beiden Antennen zu Schwingungen verschiedener Amplitude erregt. Die Strahlung von allen vier Antennen überlagert sich dann im Außenraume so, daß in der durch die Spulenstellung gegebenen Richtung die Fernwirkung ein Maximum erreicht und senkrecht dazu verschwindet.

(948) Gegensprechen und Zwischenrufen. Einrichtungen hierfür mehr und mehr in Gebrauch. Sie bezwecken, auf einer Station gleichzeitig zu senden und zu empfangen. Dies wird bei kleinen Stationen, wenn auch unvollkommen, dadurch erreicht, daß bei geöffneter Morsetaste die Empfangsapparatur automatisch eingeschaltet wird, so daß man in den Lücken zwischen den Telegraphierzeichen einen Zwischenruf der Gegenstation hören kann.

Besser gelingt gleichzeitiges Senden und Empfangen, wenn man den Sender und den Empfänger einer Station in einigem Abstand voneinander mit getrennten Antennen aufstellt und den einen mit solchen Richtantennen ausstattet, daß der eigene Sender vom Empfänger nur schwach gehört wird; der Sender kann dabei vom Empfänger aus über eine Relaisleitung getastet werden.

Erleichtert wird dieses Verfahren dadurch, daß man zum Senden und Empfangen verschiedene Wellen benutzt, so daß man außer der Richtung noch die Abstimmung zu Hilfe nimmt, um sich im Empfänger von Störungen durch den eigenen Sender frei zu machen. Auch die Gegensprecheinrichtungen bieten darum mit Einführung der ungedämpften Systeme Aussicht auf erfolgreiche Entwicklung.

(949) Schnelltelegraphie. Der Betrieb funkentelegraphischer Sender mit den in der Leitungstelegraphie gebräuchlichen Schnellsendern gelingt an sich ohne weiteres, wenigstens bei ungedämpften Sendern. Ebenso bietet es keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, die Schnellempfangseinrichtungen mit funkentelegraphischen Empfängern zu betreiben. Jedoch bilden die luftelektrischen Störungen ein so starkes Betriebshindernis für die Schnelltelegraphie, daß sie bisher nur selten angewendet wird. Jedes Mittel zur Vermeidung der luftelektrischen Störungen bringt uns darum der Einführung dieser Betriebsart näher, die besonders als Schutzmittel gegen Mithörer Bedeutung hat.

Literatur: J. Zenneck, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie, 4. Aufl. 1916. — M. Abraham, Theorie der Elektrizität, 2 Bände, 5. u. 4. Aufl. 1918/12. — H. Rein, Radiotelegr. Praktikum, 2. Aufl. 1912. — H. Rein u. Wirtz, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie. 1916. — F. F. Martens, Physikalische Grundlagen der Elektrotechnik. II, 1914. — Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie, seit 1907. — Wigge, Die neuere Entwicklung der Funkentelegraphie 1920. — H. G. Möller, Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen.

Dreizehnter Abschnitt.

Leitungsblitzableiter oder Blitzschutzvorrichtungen und Spannungssicherungen.

(950) Atmosphärische Ladungen können auf verschiedene Weise in die Leitungen elektrischer Anlagen gelangen: a) durch direkte Blitzentladungen, welche die Leitungen treffen und in der Regel die Drähte oder Isolatoren oder Leitungsmaste oder alles zugleich beschädigen[1]); wegen der großen Energie dieser direkten Blitzschläge gibt es kein Schutzmittel dagegen; b) durch Teilentladungen und Rückschläge, die weniger Energie führen; c) durch langsame Influenz heranziehender Gewitterwolken; d) durch Aufladung der Drähte aus der mit freien Ionen erfüllten umgebenden Atmosphäre; e) infolge des Durchschneidens der Niveauflächen der Erde, wenn eine Luftleitung große Höhenunterschiede überwindet; f) durch Reibung von Sand und trockenen Schneeteilchen an den Leitungsdrähten bei heftigem Winde. Die unter d) genannten sind die häufigsten. Sie können bei trockenem und trübem Wetter im Sommer und im Winter vorkommen. Die Potentialdifferenz aller atmosphärischen Ladungen besteht zwischen L e i t u n g und E r d e. Daher erfolgt auch die Durchbrechung der Isolation immer gegen E r d e, sei es unmittelbar oder mittelbar.

(951) Wirkungsweise. Um die Durchbrechung der Isolation der Leitung zu verhüten, muß den atmosphärischen Ladungen ein u n s c h ä d l i c h e r Ausgleichsweg über Funkenstrecken (F in Abb. 542 a u. b) oder unmittelbar zur Erde geboten werden. Die unter 950, a) und b) genannten Ladungen können oszillatorisch oder intermittierend oder kontinuierlich sein. Aber auch wenn sie nicht oszillatorisch sind, bestehen sie aus einem oder mehreren r a s c h zu- und abnehmenden Stromstößen. Daher wird ihnen der Zutritt zu den Maschinen oder Apparaten erschwert, wenn zwischen diese und den Ausgleichsweg eine D r o s s e l s p u l e geschaltet wird. Die unter (950) c) bis f) genannten Ladungen entstehen allmählich und bleiben längere oder kürzere Zeit konstant, so daß sie als s t a t i s c h e L a d u n g e n bezeichnet werden können. Solchen bietet also die Drosselspule keinerlei Hindernis; Spannung und Energie sind erheblich kleiner als bei den unter a) und b) genannten Ladungen.

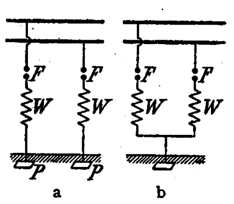


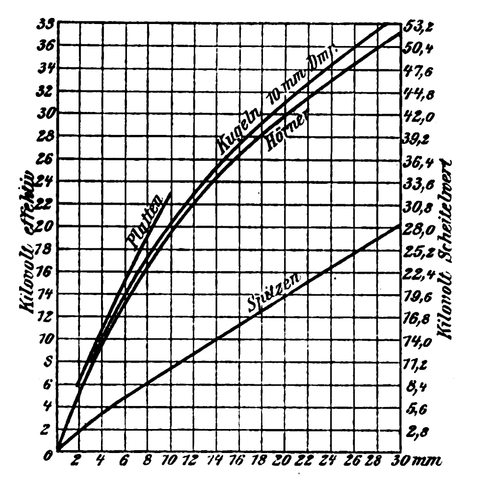
Abb. 542. Schaltungsarten.

Die Funkenstrecke muß um so kürzer eingestellt werden, je empfindlicher die Schutzvorrichtung sein soll. Dazu dienen die Kurven in Abb. 543 und 544, welche die Überschlagsspannungen für verschiedene Elektrodenformen angeben.

Für T e l e g r a p h e n- und T e l e p h o n-(Schwachstrom-) L e i t u n g e n ist damit alles gegeben. Die konstruktiven Einzelheiten beziehen sich dabei nur auf geeignete Herstellung einer möglichst kurzen und widerstandsfähigen Funken-

[1]) Vgl. die Berichte über die Fragebogen des Elektr. Vereines: ETZ 1903, S. 812; 1904, S. 287; 1907, S. 90; 1909, S. 1110.

strecke. Anders ist es bei den S t a r k s t r o m a n l a g e n, wo durch gleichzeitige Entladung an verschiedenen Polen (Phasen) ein Nebenschluß über die Erde hergestellt wird, so daß das Netz mehr oder weniger kurzgeschlossen ist. Die Funkenstrecken können durch die Kurzschlußlichtbogen zerstört werden. Daher sind diese Lichtbogen entweder zu schwächen, zu verhindern oder möglichst rasch zu beseitigen. Zu diesem Zwecke wird jeder Funkenstrecke ein induktionsloser Widerstand *W* vorgeschaltet, falls nicht die Erdplatten *P* (Abb. 542 a) soweit auseinander liegen, daß schon die dazwischen liegende Erde einen Kurzschluß verhindert. Es können dann nur solche Lichtbogen entstehen, welche keinen Schaden verursachen. Um auch diese noch zu verhindern oder möglichst rasch zu unterbrechen, müssen die Schutzvorrichtungen besonders eingerichtet sein.



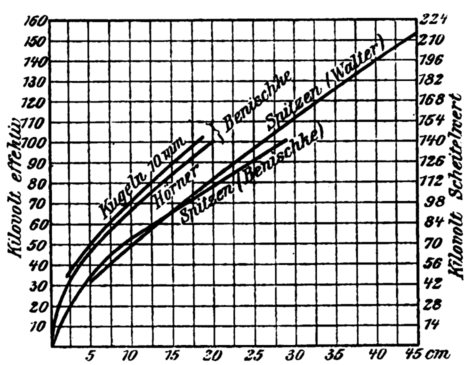


Abb. 543 und 544. Überschlagsspannungen für verschiedene Elektrodenformen.

(952) Überspannungen sind jene Ladungen, welche durch Vorgänge in der elektrischen Anlage selbst erzeugt werden. Das sind: 1. R e s o n a n z s p a n n u n g in Wechselstromkreisen mit Kapazität und Selbstinduktion in Reihenschaltung. Diese Reihenschaltung kann bei einpoligen Schaltvorgängen und Erdschlüssen vorkommen. Für eine Resonanz der Grundwelle (Betriebsfrequenz) sind aber Kapazität und Selbstinduktion der jetzigen Elektrizitätswerke zu klein, so daß praktisch nur die Resonanz eines Gliedes höherer Ordnung zu befürchten ist. Durch sekundäre Ströme (belastete Transformatoren) wird eine Resonanz beinahe unmöglich gemacht, so daß sie auch für höhere Glieder nur bei l e e r l a u f e n d e n Transformatoren zu befürchten ist[1]). 2. E x t r a s t r o m und - s p a n n u n g beim plötzlichen Unterbrechen eines kapazitätslosen, aber induktiven Stromkreises; 3. O s z i l l i e r e n d e S p a n n u n g beim S c h l i e ß e n eines Stromkreises mit Kapazität und Selbstinduktion. 4. T r a n s f o r m i e r t e D a u e r s c h w i n g u n g e n. Dauernde Schwingungen entstehen in einem

[1]) ETZ 1916, S. 82.

Lichtbogen, wenn er sich in der Nähe seines labilen Zustandes befindet. Sie haben von vornherein nur die Spannung, welche zwischen den Elektroden des Lichtbogens besteht. Wenn aber mit ihrem Stromkreis ein anderer Stromkreis auf höheres Übersetzungsverhältnis magnetisch gekuppelt ist, so tritt in diesem die Schwingung mit entsprechend höherer Spannung auf. 5. Überspannungen, welche in einem ungleich belasteten mehrphasigen Stromerzeuger entstehen. Wird eine Phase mit viel mehr Strom belastet als die anderen (z. B. bei einem Kurzschluß), so tritt eine derartige unsymmetrische Stauung der magnetischen Kraftlinien ein, daß die EMK der überlasteten Phase sinkt, während die der anderen Phasen auf den 2- bis 3-fachen Wert ansteigen kann. Andere Überspannungen kommen hier nicht in Betracht, weil entweder ihre Spannung oder ihre elektrische Energie zu klein ist, um normale Isolationen durchbrechen zu können. Das Unterbrechen eines Stromkreises mit Kapazität und Selbstinduktion erzeugt keine Überspannung. Die dabei auftretende Spannungsamplitude kann keinen größeren Wert als die EMK der Stromquelle erreichen. Über die dabei entstehenden fortschreitenden Wellen vgl. (956).

Die Potentialdifferenz der Überspannungen besteht zwischen Leitungen oder Windungen verschiedener Polarität (Phase). Daher erfolgt die etwaige Durchbrechung der Isolation zwischen solchen Leitungen oder zwischen verschiedenen Windungen derselben Wicklung[1]) (115) S. 99. Im allgemeinen kommen gefährliche Überspannungen nicht so häufig vor, als es nach der theoretischen Literatur den Anschein hat. Die meisten Isolationsdurchschläge sind nicht auf Überspannungen, sondern auf fehlerhafte Stellen in der Isolierung, auf Überbeanspruchung bei der Isolationsprüfung und auf atmosphärische Entladungen zurückzuführen.

(953) Spannungssicherungen. Grob- und Feinschutz. Die Vorrichtungen, welche Überspannungen unschädlich machen sollen (Spannungssicherungen), haben einen Ausgleichsweg zwischen den Leitungen verschiedener Polarität (Phase) herzustellen. Wie man sofort sieht, ist dies auch bei den durch Abb. 542 a u. b dargestellten Schaltungen der Blitzschutzvorrichtungen der Fall, so daß auch die Spannungssicherungen so geschaltet werden können. Bei reinen Kabelnetzen, wo atmosphärische Ladungen nicht vorkommen, genügt die Schaltung der Abb. 542 b ohne Erdschluß. Alle Blitzschutzvorrichtungen können grundsätzlich als Spannungssicherungen verwendet werden. Jedoch besteht ein wesentlicher Unterschied in der Einstellung der Funkenstrecke und in der Größe des Vorschaltwiderstandes. Da die Überspannungen im allgemeinen viel kleinere Spannung haben als die atmosph. Ladungen, müssen die Spannungssicherungen empfindlicher eingestellt werden. Andererseits haben die Überspannungen kleinere Energie als atmosph. Ladungen, so daß der Ausgleichsweg einen größeren Widerstand (Vorschaltwiderstand W) enthalten darf. Das hat weiter zur Folge, daß die Funkenstrecke noch kürzer eingestellt werden kann, ohne daß deren Zerstörung zu befürchten ist. Man kann daher unterscheiden zwischen Grobschutz (längere Funkenstrecke mit kleinerem Vorschaltwiderstand zur Ableitung stärkerer atmosph. Ladungen) und Feinschutz (kürzere Funkenstrecke mit größerem Vorschaltwiderstand oder unmittelbare Erdverbindung über einen induktionslosen Widerstand, (962), (966), zur Ableitung von Überspannungen und statischen Ladungen).

(954) Vorbeugende Mittel gegen atmosph. Ladungen. Es gibt Anlagen, die keiner Schutzvorrichtungen gegen atmosph. Entladungen bedürfen. Das sind alle jene, die nur unterirdische Leitungen haben, und bis zu einem gewissen Grade auch jene, deren Luftleitungen nur zwischen überragenden Gebäuden und Bäumen

[1]) Näheres über Entstehung, Energie, Spannung, Frequenz und Dämpfung der Überspannungen vgl. Benischke, Die Schutzvorrichtungen der Starkstromtechnik gegen atmosphärische Entladungen und Überspannungen. Braunschweig, 2. Aufl. 1911. — Ferner: Die elektrischen Überspannungen in der Entwicklung der Hochspannungstechnik. E. u. M. Wien 1917, S. 609.



verlaufen. Leitungen, die in tiefen, schmalen Tälern verlaufen, sind wenig gefährdet. In manchen Fällen kann also schon durch geeignete Führung der Freileitungen ein vorbeugender Schutz gewonnen werden.

Da der Durchbruch einer in eine Leitung gelangten atmosph. Ladung immer gegen Erde hin stattfindet, so bildet die isolierte Aufstellung der Maschinen und Apparate ein wirksames vorbeugendes Mittel, das allerdings nicht immer ausführbar ist oder doch erhebliche Schwierigkeiten macht.

Die atmosph. Ladungen sind von der Betriebsspannung ganz unabhängig. Da die Isolierung einer elektrischen Anlage in allen ihren Teilen um so stärker ist, je höher die Betriebsspannung ist, so ist sie durch atmosph. Ladungen um so weniger gefährdet, je höher die Betriebsspannung ist. Anlagen für mehr als 50 kV haben fast nur die unter a) und b) (950) genannten direkten Blitzschläge und Teilentladungen zu fürchten. Daher werden solche Anlagen häufig ohne Blitzschutzvorrichtungen ausgeführt und nur ein oder mehrere Schutzdrähte aus Eisen parallel über die Stromleitungen gespannt[1]) und allenfalls noch die Leitungsmasten, wenn sie aus Holz sind, mit geerdeten Auffangspitzen versehen. Isolatoren auf die Mastspitzen zu setzen, ist verfehlt.

(955) Vorbeugende Mittel gegen Überspannungen. Da die Überspannungen im engeren Sinne ihre Ursache in der Anlage selbst haben, sind sie in den meisten Fällen der Betriebsspannung proportional; eine Abnahme der Gefährdung mit wachsender Betriebsspannung besteht also da nicht.

Die durch das Schließen und Öffnen eines Stromkreises, durch intermittierende Erd- und Kurzschlüsse entstehenden oszillierenden Überspannungen sowie die Resonanzspannungen sind nur bei Kapazität möglich. Eine möglichste Vermeidung der Kapazität bedeutet also eine Verminderung der Überspannungsgefahr, und zwar auch dann, wenn die Höhe der Überspannung von der Größe der Kapazität unabhängig ist, weil dann wenigstens die Energie der Überspannung um so kleiner ist, je kleiner die Kapazität ist. Die beim Schließen (Einschalten) eines Stromkreises mit Selbstinduktion und Kapazität entstehende oszillierende Überspannung kann niemals das Doppelte der Stromquellenspannung übersteigen. Ist die Isolation der Anlage danach bemessen, so kann aus dieser Ursache ein Durchschlag der Isolation zwischen Leitungen verschiedener Pole nicht vorkommen. Es bleibt dann nur die Gefahr, daß beim Eindringen einer solchen oszillierenden Überspannung (fortschreitende Welle) in eine Wicklung die innere Isolation durchbrochen wird (956).

Sollen die beim Ein- und Ausschalten möglichen Überspannungen vermieden werden, so muß das Ein- und Ausschalten allmählich oder stufenweise über induktionslose Widerstände (Schalter mit Vorkontakt) erfolgen[2]) (115), S. 99.

Ein vorbeugendes Mittel gegen die bei intermittierenden Erdschlüssen vorkommenden Überspannungen bildet die Erdung eines Spannungsnullpunktes (neutraler Punkt bei Dreiphasenstrom) über eine Drosselspule, deren nacheilender induktiver Strom dem voreilenden Kapazitätsstrom des Netzes gegen Erde im Wege des Erdschlusses parallelgeschaltet ist. Sie heben sich daher teilweise oder bei richtiger Abgleichung der Drosselspule ganz auf, so daß nur die Wattkomponente bestehen bleibt[3]). In diesem Falle besteht aber auch Resonanz. und in Netzen mit unsymetrischer Spannung ergibt sich aus der Spannung zwischen Neutralpunkt und Erde im normalen Betriebe eine Resonanzüberspannung, so daß die völlige Abgleichung besser vermieden wird[4]).

(956) Fortschreitende Wellen. Stehende Wellen (115). Durch Schaltvorgänge jeder Art, plötzliche Erdschlüsse, sowie durch Induktion bei Blitzschlägen in der Nähe einer Leitung entstehen in den Leitungsdrähten fortschreitende Wellen

[1]) Vgl. ETZ 1908, S. 218; 1910, S. 1024, 1257; 1913, S. 1242; 1919, S. 143.

[2]) Über die Verwendung eines streuungslosen Transformators als induktionsloser Anlasser vgl. Elektr. Kraftbetr. u. Bahnen 1907, S. 408.

[3]) Petersen, ETZ 1919, S. 5, 17.

[4]) Jonas, E. u. M. Wien 1920, S. 453.



(Wanderwellen), für welche die allgemeinen Gesetze der Wellenlehre gelten. Entstehen sie durch Schließen eines Stromkreises, so bleibt der größtmögliche Scheitelwert (Amplitude) unter der doppelten EMK der Stromquelle. Entstehen sie durch Öffnen eines Stromkreises, so kann ihre EMK die der Stromquelle nicht übersteigen. Der äußeren Isolation sind also diese Wellen unter gewöhnlichen Umständen nicht gefährlich. Hingegen sind sie der inneren Isolation einer Wicklung, d. h. der Isolation zwischen benachbarten Windungen und Windungslagen derselben Spule gefährlich, weil diese nur aus einer dünnen Schicht Baumwolle, Seide, Papier, Emaille oder Oxyd besteht. Die Gefahr besteht aber nur während jener kurzen Zeit, während deren die Welle in die Wicklung eindringt. Die Spannung zwischen zwei benachbarten Windungen ist dabei um so größer, je steiler die Stirn der fortschreitenden Welle ist. Senkrechte Wellenstirnen gibt es aber nicht, weil das Öffnen und Schließen eines Stromkreises fast immer mit Funkenbildung verbunden ist, und weil der Ohmsche Widerstand sowie Hysterese und Wirbelströme dämpfend wirken, indem sie die Wellenstirn erniedrigen und abflachen [1]). Zum Teil schützt sich jede Wicklung dadurch schon selbst, daß sie den größten Teil der ankommenden Welle reflektiert. Der reflektierte Teil ist um so größer, je größer der Unterschied zwischen den induktiven Widerständen aufeinander folgender Leitungselemente ist. Die Wicklung wird noch mehr geschützt, wenn die Reflektion schon vor der Wicklung durch eine vorgeschaltete Drosselspule bewirkt wird. Dabei kommt es nicht so sehr auf die gesamte Selbstinduktion der Drosselspule, sondern darauf an, daß der induktive Widerstand einer Windung möglichst groß ist. Daher empfiehlt sich die Anwendung einer Drosselspule mit Eisenkern. Der nicht reflektierte Teil der Welle dringt weiter vor. Dabei wird er durch Hysterese und Wirbelströme stark gedämpft, weil die Frequenz der Welle im allgemeinen sehr groß ist. In ähnlicher Weise, aber weniger stark wirkt eine Drosselspule ohne Eisenkern, aber aus Eisendraht. Der reflektierte Teil einer Welle bildet auf der Leitung mit den noch ankommenden Schwingungen eine stehende Welle, die so lange besteht, bis die Schwingung durch Dämpfung aufgezehrt ist. Eine fortschreitende Welle wird auch durch einen im Nebenschluß liegenden Kondensator reflektiert. Der Stromverbraucher oder Stromerzeuger wird aber dadurch nicht geschützt, weil der Kondensator eben nicht vor ihm liegt, so daß der größte Teil der fortschreitenden Welle an diesem vorbei zur Wicklung gelangt (953).

(957) Schutzvorrichtungen mit mehreren in Reihe geschalteten Funkenstrecken. Wenn soviel Funkenstrecken hintereinander geschaltet werden, daß auf eine weniger als 25 V entfallen, so kann ein Lichtbogen nicht bestehen. Das wäre aber eine zu unempfindliche Schutzvorrichtung, da jede Funkenstrecke nicht kürzer als 0,5 mm eingestellt werden darf, um Überbrückung durch Staub und dgl. zu vermeiden. Schaltet man jedoch einen genügend hohen Widerstand W (Abb. 545) vor und stellt die Elektroden aus massiven Metallwalzen her, welche die Fußpunkte der Lichtbogen stark abkühlen, so lassen sich bei Wechselstrom 100 V auf jede solche Funkenstrecke anwenden, ohne daß ein dauernder Lichtbogen entsteht. Der hohe Vorschaltwiderstand ist auch deswegen nötig, weil sonst Überspannungen durch hintereinander geschaltete intermittierende Entladungen entstehen können. Wegen des hohen Vorschaltwiderstandes sind diese Schutzvorrichtungen nicht als Grobschutz, sondern nur als Feinschutz geeignet.

(958) Vorrichtungen, welche den Lichtbogen abreißen. Bei der durch Abb. 546 dargestellten Schutzvorrichtung findet die Entladung der schädlichen Ladungen über die hintereinander geschalteten Funkenstrecken F_1 und F_2 statt. Die letztere hat eine bewegliche Elektrode K. Folgt der Entladung ein Strom aus dem Netze nach, so geht er z. T. durch die Wicklung W, infolgedessen wird K emporgezogen und der bei F_2 entstandene Lichtbogen zerrissen. Wegen der beschränkten Funkenstrecke kann diese Vorrichtung nur bis zu 200 V Gleichstrom und 400 V Wechsel-

[1]) Hiecke, Einfluß des Ohmschen Widerstandes usw. E. u. M. Wien 1919, S. 125.

strom (Betriebsspannung eines Zweileiternetzes, also 100 V bzw. 200 V auf den Pol) benutzt werden.

(959) Schutzvorrichtungen mit magnetischem Gebläse im Nebenschluß. Zwischen den Polen eines hufeisenförmigen Magnets (Abb. 547) befindet sich die Funkenstrecke F. Sobald einer Entladung ein Strom aus dem Netze nachfolgt, muß er die Magnetwicklung M passieren. Das dadurch erzeugte magnetische Feld löscht den Lichtbogen sofort aus. Damit oszillierende Entladungen einen induktionsfreien Weg zur Erde finden, ist der Magnetwicklung M ein Karborundumstab W_1 parallel geschaltet. Damit der Strom aus dem Netze nicht zu stark wird, ist dem Ganzen noch der Karborundumstab W_2 vorgeschaltet.

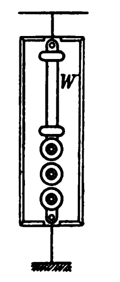


Abb. 545. Mehrere Funkenstrecken in Reihe.

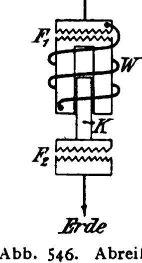


Abb. 546. Abreißen des Lichtbogens.

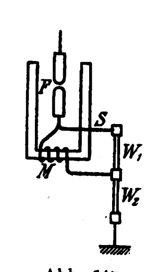


Abb. 547. Magnetisches Gebläse.

Abb. 548 zeigt eine ähnliche Einrichtung. Hier befinden sich zwei hintereinander geschaltete Funkenstrecken $A—B$ und $A—C$ im magnetischen Felde der vom Netzstrom durchflossenen Magnetspule M. Das zu starke Anwachsen dieses Stromes wird teils durch die der Spule M vorgeschaltete Funkenstrecke $A—C$, teils durch einen besonderen Vorschaltwiderstand verhindert.

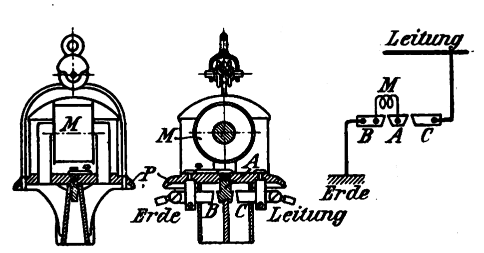


Abb. 548. Magnetisches Gebläse.

(960) Schutzvorrichtungen, bei welchen der Lichtbogen durch seine Eigenwirkung erlischt. Für höhere Spannungen eignet sich besser die aus 2 hörnerförmigen Elektroden gebildete Schutzvorrichtung Abb. 549. Der an der engsten Stelle bei a entstehende Lichtbogen wird durch den Auftrieb der heißen Luft und die elektrodynamische Eigenwirkung nach oben getrieben und dadurch so weit verlängert, bis er erlischt. Bei der Montage ist also darauf Rücksicht zu nehmen, daß der Lichtbogen oben genügend freien Raum findet. Für sehr hohe Spannungen empfiehlt es sich, zwei oder auch mehrere solche Hörnerschutzvorrichtungen hintereinander zu schalten (Abb. 550), damit der Lichtbogen nicht so hoch wird und eher erlischt. Zweckmäßig ist es dabei, einer dieser Schutzvorrichtungen einen induktionslosen Widerstand W_n parallel und vor das ganze den Vorschaltwider-

stand W_v zu schalten. Ladungen von sehr hoher Spannung durchschlagen die beiden hintereinander geschalteten Funkenstrecken, während solche von kleinerer Spannung nur die erste Funkenstrecke zu durchschlagen brauchen und dann weiterhin den Weg über W_n nehmen können.

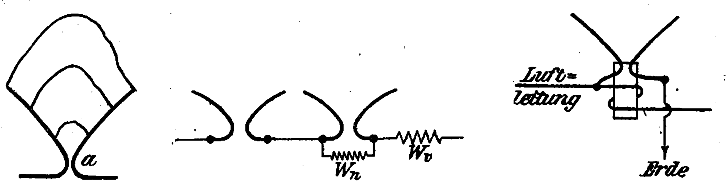


Abb. 549. Hörnerableiter. Abb. 550. Doppelter Hörnerableiter. Abb. 551. Hörnerableiter mit Blasmagnet.

(961) Hörnerschutzvorrichtungen mit magnetischem Gebläse in Reihenschaltung. Bei Hörnerschutzvorrichtungen für niedrige und mittelhohe Spannungen, deren Funkenstrecke eng eingestellt ist, dauert es einige Augenblicke, bis sich der Lichtbogen aus der engsten Stelle entfernt hat. Während dieser Zeit besteht ein unangenehmer Spannungsabfall im Netz und die Gefahr, daß die Hörner stark verbrannt werden. Schaltet man, um das zu vermeiden, einen großen Widerstand vor, so besteht die Gefahr, daß der Auftrieb zu gering ist, weil dieser der Stromstärke proportional ist. Daher empfiehlt sich die Anwendung eines magnetischen Gebläses, das in die vom Stromerzeuger herkommende Arbeitsleitung derart eingeschaltet ist (Abb. 551), daß der Lichtbogen nach oben getrieben wird. Bei Wechsel strom ändert sich die Richtung dieses Auftriebes nicht, weil der Strom im Lichtbogen und im magnetischen Gebläse gleichzeitig sein Vorzeichen wechselt. Dient die Vorrichtung zum Schutz von Stromerzeugern (sekundäre Transformatorwicklung, Kabelende), so wirkt die Magnetwicklung gleichzeitig als Drosselspule. Bei Stromverbrauchern (primäre Transformatorwicklung, Kabelanfang) liegt die Gebläsewicklung vor der Funkenstrecke, so daß noch eine besondere Drosselspule vor dem zu schützenden Objekte nötig ist. Bei großen Stromstärken, wo die Gebläsewicklung aus einem großen Kupferquerschnitt hergestellt werden müßte, wird sie in die Erdleitung eingeschaltet und aus dünnem Drahte hergestellt. Da sie nun aber einen beträchtlichen induktiven Widerstand enthält, so wird ihr ein Karborundumstab oder bei großem Vorschaltwiderstand eine kurze Funkenstrecke parallel geschaltet, damit oszillierende Entladungen an der Gebläsewicklung vorbei zur Erde gelangen können.

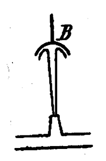


Abb. 552. Wasserstrahlerder.

(962) Unmittelbare Erdung, Wasserstrahlerder. Die empfindlichste Schutzvorrichtung (Feinschutz) besteht aus einer unmittelbaren Verbindung jeder Leitung mit der Erde über einen induktionslosen Widerstand. Weil das aber einen dauernden Stromverlust bedeutet, muß der Widerstand verhältnismäßig groß gewählt werden, was zur Folge hat, daß starke Ladungen nicht rasch genug abgeleitet werden. Wo solche in Frage kommen (bei längeren Luftleitungen), müssen also unbedingt noch Grobschutzvorrichtungen vorgesehen werden.

Am einfachsten läßt sich die Erdung durch Wasserstrahlen herstellen, weil diese auch die Stromwärme mit fortführen. Solche Wasserstrahlen können fallende oder steigende sein. Im ersten Falle muß das Ausflußgefäß mit der Leitung verbunden, also von Erde isoliert werden, dagegen das Auffanggefäß geerdet werden. Im zweiten Falle muß das Ausflußgefäß geerdet und der Prellbecher B (Abb. 552) mit der Leitung verbunden werden, was sich bei

hohen Spannungen leichter ausführen läßt. Wo die Kosten des Wasserverbrauches erheblich sind, werden Metalldrahtwiderstände mit Ölkühlung oder Drähte mit Emailleüberzug oder Karborundumstäbe oder Gefäße mit pulverisierten Widerstandsmaterialien verwendet. Zur Ableitung statischer Ladungen können auch induktive Widerstände (Drosselspulen) zwischen Leitung und Erde oder zwischen Wicklungsnullpunkt (neutraler Punkt bei Drehstrom) und Erde verwendet werden (955).

(963) Kapazitätswiderstände. Um den Stromverlust, der mit der Anwendung induktionsloser Widerstände verbunden ist, zu vermeiden, wurde wiederholt die Einschaltung eines Kondensators zwischen Leitung und Erde als Ausgleichswiderstand vorgeschlagen. Soweit der wattlose Kapazitätsstrom in Betracht kommt, beruht das auf einem grundsätzlichen Irrtum[1]). Nur der Leistungsstrom, der durch den Kondensator hindurchgeht, wenn das Dielektrikum kein vollkommenes ist, wirkt ableitend (ausgleichend). Je schlechter also ein solcher Kondensator ist, desto eher ist er als Spannungsableiter brauchbar. Daneben kann aber die vorhandene Kapazität insofern schädlich wirken, als sie Überspannungsmöglichkeiten erzeugt oder die elektrische Energie solcher Überspannungen vergrößert.

(964) Aluminiumzellen. Elektroden aus Aluminium in gewissen elektrolytischen Lösungen überziehen sich beim Stromdurchgang mit einer dünnen isolierenden Schicht aus Aluminiumhydroxyden, so daß der Stromdurchgang wieder aufhört, wenn die Spannung eine gewisse Grenze, z. B. 300 V, nicht übersteigt. Durch Hintereinanderschaltung einer entsprechenden Zahl solcher Zellen kann also der von einer Überspannung verursachte Stromdurchgang wieder aufgehoben werden. Jede Zelle ist aber gleichzeitig ein Kondensator, dessen Dielektrikum aus der erwähnten Hydroxydschicht besteht. Infolgedessen geht bei Wechselstrom ein dauernder Strom durch, welcher die elektrolytische Flüssigkeit zu sehr erwärmt. Daher wird eine Funkenstrecke vorgeschaltet, so daß die Zellen nun eigentlich nur mehr als Vorschaltwiderstand erscheinen, der die Eigenschaft hat, bei Überschreitung einer gewissen Stromstärke auf einen sehr hohen Wert zu steigen. Da durch Einschaltung der Funkenstrecke der Stromdurchgang bei normaler Betriebsspannung beseitigt wurde, verliert sich nach einiger Zeit die Hydroxydschicht. Daher müssen solche Zellen täglich formiert werden, indem sie einige Minuten lang an die Netzspannung unmittelbar angeschlossen werden.

(965) Erdleitung. Die Leitung von der Funkenstrecke zur Erde soll den kürzesten Weg einschlagen. Merkliche Selbstinduktion darf sie nicht enthalten, weil diese im Falle oszillatorischer Entladung einen großen induktiven Widerstand darstellt. Dagegen empfiehlt es sich, einen gewissen, von der Länge der Funkenstrecke, also von der Betriebsspannung abhängigen induktionsfreien Widerstand in die Erdleitung zu legen, um heftige Kurzschlüsse zu vermeiden (951). Für den Übergang zur Erde ist eine möglichst großflächige Berührung mit dem Erdreich notwendig. Bei feuchtem (Humus-) Boden genügt eine Blechplatte von 1 m². Bei Sand- und Steinboden empfiehlt es sich, strahlenförmig ausgehende Drähte oder Bänder bis zu 10 m Länge zu verlegen.

(966) Örtlichkeit, Schaltung. Um die Funkenstrecke möglichst empfindlich einstellen zu können, empfiehlt es sich, die Vorrichtung vor Niederschlägen geschützt, also unter Dach anzubringen. Statt mehrere Blitzschutzvorrichtungen auf die ganze Leitungslänge zu verteilen, ist es besser, vor dem zu schützenden Objekt mehrere hintereinander, durch Drosselspulen getrennt (Abb. 553), anzubringen. Ist die erste Funkenstrecke nicht in der Lage, die ganze von außen kommende Ladung abzuleiten, so bietet die nächstfolgende nochmals einen Weg zur

[1]) Vgl. Benischke, ETZ 1906, S. 490; 1915, S. 34. — Döry, Elektr. u. Maschinenbau, Wien 1909, S. 137. — Schrottke, ETZ 1908, S. 798; 1910, S. 444. — Prehm, ETZ 1914, S. 417, 629.

Erde usf. Als letzte, empfindlichste Schutzvorrichtung dient der Wasserstrahlerder *F*. Durch diese Anordnung wird gleichzeitig verhindert, daß bei etwaigem Auftreten stehender Schwingungen die einzige Blitzschutzvorrichtung zufälligerweise in einen Schwingungsknoten zu liegen kommt, und dadurch der Schutz nicht eintritt. Der Wasserstrahlerder kann bei mangelndem Wasser wegbleiben, wenn die letzte Vorrichtung (4) empfindlich genug ist. Andererseits können (3) und (4) wegbleiben, wenn der Wasserstrahlerder keinen zu hohen Widerstand hat. Um die Funkenstrecken, Widerstände usw. untersuchen zu können, empfiehlt es sich, die ganze Schutzeinrichtung mittels des Nebenschlusses *N* und der Schalter *A* und *B* abschaltbar zu machen.

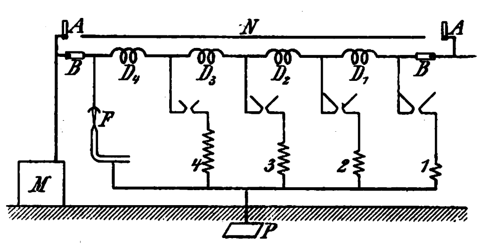


Abb. 553. Schutzeinrichtung gegen atmosphärische Entladungen und Überspannungen.

In gleicher Weise ist natürlich nicht nur die Zentralstation, sondern auch jede Unterstation und jedes zwischen Luftleitungen liegende Kabel zu schützen. Bei kurzen Kabelstücken, die nur zu Unterführungen notwendig sind, würde das teuer sein. Man verwendet daher zu solchen kurzen Stücken besonders stark isolierte Kabel. Sind alle Stellen in solcher Weise hinreichend geschützt, so brauchen auf der Leitungsstrecke keine Schutzvorrichtungen angebracht zu werden; es sei denn, daß eine Stelle (Bergrücken) vorhanden ist, welche besonders häufig atmosphärische Ladungen aufnimmt. Über Schutzdrähte vgl. (954).

Anhang.

Übersicht über Gesetze, Verordnungen, Ausführungsbestimmungen, Vorschriften aus dem Gebiete der Elektrotechnik.

Es werden nur die Überschriften der Gesetze, Verordnungen usw., ihr Datum und die Stelle, wo sie erschienen sind, mitgeteilt, öfter einige Worte über den Gegenstand beigefügt. Der Stern hinter der Nummer bedeutet vollständigen oder wenig gekürzten Abdruck in der vorigen Auflage dieses Buches.

Die Normalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker werden hier nicht erwähnt.

1. *Gesetz, betr. die elektrischen Maßeinheiten. Vom 1. Juni 1898. Reichsgesetzblatt S. 905. — Deutscher Reichsanzeiger Nr. 138 vom 14. Juni 1898.

(Einheiten für elekrische Messungen: Ohm, Ampere und Volt. Amtliche Prüfung).

2. *Bestimmungen zur Ausführung des Gesetzes betr. die elektrischen Maßeinheiten. (Erlassen vom Bundesrat am 6. Mai 1901; Reichsgesetzblatt S. 127; Deutscher Reichsanzeiger Nr. 110. — Erläuterungen dazu von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ETZ 1901, S. 531.)

(Darstellung des Ampere; Bezeichnungen weiterer Einheiten; Fehlergrenzen der Zähler.)

3. *Prüfordnung für elektrische Meßgeräte. Zentralblatt für das Deutsche Reich vom 14. März 1902, Nr. 11, S. 46; veraltet, in neuer Bearbeitung begriffen.

(Prüfung und Beglaubigung. Systemprüfung. Prüfämter. Fehlergrenzen. Stempel. Gebühren.)

4. *Prüfungsbestimmungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Vom 31. März 1910.

(Arbeitsgebiete der Reichsanstalt. Prüfung und Beglaubigung. Bescheinigungen, Stempelung. Gebühren. Mitteilung und Veröffentlichung von Prüfungsergebnissen.)

6. *Gesetz, betr. die Bestrafung der Entziehung elekt. Arbeit. Vom 9. April 1900. Reichsgesetzblatt S. 228. — Deutscher Reichsanzeiger Nr. 97 vom 23. April.

7. *Gesetz, betr. die Kosten der Prüfung überwachungsbedürftiger Anlagen. Vom 21. März 1905 (preußisches Gesetz). Gesetzsammlung S. 317. — ETZ 1905, S. 364.

8. *Gesetz über das Telegraphenwesen des Deutschen Reichs. Vom 6. April 1892. Reichsgesetzblatt S. 467. — Deutscher Reichsanzeiger Nr. 89 vom 12. April 1892.

(Telegraphenregal nebst Ausnahmen, Schutz gegen Betriebsstörungen.)

9. *Das Telegraphenwegegesetz. Vom 18. Dezember 1899. Reichsgesetzblatt S. 705. — Deutscher Reichsanzeiger Nr. 304 vom 27. Dezember 1899.

(Recht der Telegraphenverwaltung, Verkehrswege zu benutzen, und dessen Grenzen. Tragung der Kosten. Bevorrechtigte Anlagen. Planfeststellungsverfahren. Benutzung des Luftraums.)

10. *Ausführungsbestimmungen des Reichskanzlers zum Telegraphenwegegesetz. Vom 26. Januar 1900. Reichsgesetzblatt S. 7. — Deutscher Reichsanzeiger Nr. 30 vom 1. Februar 1900.

(Maß der Ausästungen; was sind wesentliche Änderungen der Telegraphenlinien? Einzelheiten des Planfeststellungsverfahrens.)

11. *Allgemeine Vorschriften für die Ausführung und den Betrieb neuer elektrischer Starkstromanlagen (ausschließlich der elektrischen Bahnen) bei Kreuzungen und Näherungen von Telegraphen- und Fernsprechleitungen. (Herausgegeben vom Reichspostministerium.)

(Erde nicht als Rückleitung zu benutzen. Schutz gegen Störungen bei Näherung und Kreuzung. Schutz gegen Gefahren.)

Hierzu ist neuerdings eine Ergänzung erschienen über die Einschränkung in der Verwendung isolierter Drähte bei den Freileitungen der Niederspannungsanlagen. ETZ 1920, S. 78.

12. *Allgemeine Vorschriften zum Schutz vorhandener Reichs-Telegraphen- und Fernsprechanlagen gegen neue elektrische Bahnen.

(Schutzvorrichtungen. Rückleitung durch die Schienen. Störungen des Telegraphen- und Fernsprechbetriebs.)

13. Bestimmungen für die bruchsichere Führung von Hochspannungs-Freileitungen über Reichs-Telegraphen und Fernsprechleitungen (herausgegeben vom Reichspostministerium im Mai 1920).

(Geltung der Normalien des VDE. Leitungen. Baustoffe. Sicherheit. Querschnitt der Drähte, Durchhang, Schutzmittel, Abstände. — Stützpunkte. Baustoffe. Berechnung der Maste. Beanspruchung der Bauteile. Fundamente. — Befestigung der Leitungen. Querträger, Stützen, Isolatoren. — Prüfung — Inbetriebnahme.)

14. Bedingungen für die Zulassung von Holzmasten als Stützpunkte von Hochspannungs-Freileitungen bei ihrer bruchsicheren Führung über Reichs-Telegraphen- und Fernsprechleitungen.

Herausgegeben vom Reichspostministerium im August 1920. (Festsetzungen über bauliche Einzelheiten.)

15. Bedingungen für fremde Starkstromleitungen auf Bahngelände. Erlaß des preuß. Ministers der öffentlichen Arbeiten vom 6. Mai 1914. — ETZ 1914, S. 803.

(Geltung der Normalien des VDE. Sicherheit gegen Störungen des Eisenbahnbetriebes gegen Gefährdung von Personen, gegen Störungen der Eisenbahn-Telegraphen- und Fernsprechleitungen. Maßbestimmungen. Schutzbrücken, Schutznetze. Aufhängungsarten der Starkstromleitungen. Schutzvorkehrungen. — Genehmigung, Bauausführung und Unterhaltung der Starkstromleitungen. Verbesserung, Außerbetriebsetzung, Änderung, Beseitigung der Starkstromleitungen, Änderung der Bahnanlage.)

16. Leitsätze zum Schutze von Fernsprech-Doppelleitungen gegen die Beeinflussung durch Drehstromleitungen. (ETZ 1920, S. 597, 840.)

Aufgestellt vom VDE, angenommen Sept. 1920, vom Reichs-Postministerium anerkannt.

(Nulleiter. Erdung, Unterteilung des Netzes, Maßregeln bei Parallelführung.)



Sätze, Einheits- und Formelzeichen des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen (AEF).

Satz I. Der Wert des mechanischen Wärmeäquivalents.

1. Der Arbeitswert der 15°-Grammkalorie ist $4{,}189 \cdot 10^7$ Erg.
2. Der Arbeitswert der mittleren (0°, bis 100°)-Kalorie ist dem Arbeitswert der 15°-Kalorie als gleich zu achten.
3. Der Zahlenwert der Gaskonstante ist:
   $R = 8{,}316 \cdot 10^7$, wenn als Einheit der Arbeit das Erg gewählt wird; $R = 1{,}985$, wenn als Einheit der Arbeit die Grammkalorie gewählt wird.
4. Das Wärmeäquivalent des internationalen Joule ist 0,23865 15°-Grammkalorie.
5. Der Arbeitswert der 15°-Grammkalorie ist 0,4272 kgm, wenn die Schwerkraft bei 45° Breite und an der Meeresoberfläche zugrunde gelegt wird.

Satz II. Leitfähigkeit und Leitwert.

Das Reziproke des Widerstandes heißt Leitwert, seine Einheit im praktischen elektromagnetischen Maßsystem Siemens; das Zeichen für diese Einheit ist S.

Das Reziproke des spezifischen Widerstandes heißt Leitfähigkeit oder spezifischer Leitwert.

Satz III. Temperaturbezeichnungen.

1. Wo immer angängig, namentlich in Formeln, soll die absolute Temperatur, die mit T zu bezeichnen ist, benutzt werden.

2. Für alle praktischen und viele wissenschaftlichen Zwecke, bei denen an der gewöhnlichen Celsiusskala festgehalten wird, soll empfohlen werden, lateinisch t zu verwenden, sofern eine Verwechslung mit dem Zeitzeichen t ausgeschlossen ist.

Wenn gleichzeitig Celsiustemperaturen und Zeiten vorkommen, so soll für das Temperaturzeichen das griechische ϑ verwendet werden.

Beispiel.

So soll man bei der Verwendung des Carnot-Clausiusschen Prinzips statt $Q\frac{dt}{t+273} \cdots Q\frac{dT}{T}$ schreiben, anderseits soll die Längenänderung eines Stabes ausgedrückt werden durch die Formel: $l = l_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$.

Satz IV. Einheit der Leistung.

Die technische Einheit der Leistung heißt Kilowatt. Sie ist praktisch gleich 102 Kilogrammeter in der Sekunde und entspricht der absoluten Leistung 10^{10} Erg in der Sekunde. Einheitsbezeichnung kW.

Zeichen für Maßeinheiten.

(Nur in Verbindung mit Zahlen; gerade lateinische Buchstaben.)

Meter	m	Quadratkilometer	km²	Kubikmeter	m³
Kilometer	km	Quadratdezimeter	dm²	Kubikdezimeter	dm³
Dezimeter	dm	Quadratzentimeter	cm²	Kubikzentimeter	cm³
Zentimeter	cm	Quadratmillimeter	mm²	Kubikmillimeter	mm³
Millimeter	mm				
Mikron	μ			Tonne	t
		Liter	l	Gramm	g
		Hektoliter	hl	Kilogramm	kg
Ar	a	Deziliter	dl	Dezigramm	dg
Hektar	ha	Zentiliter	cl	Zentigramm	cg
Quadratmeter	m²	Milliliter	ml	Milligramm	mg

Stunde	h	Ampere	A	Milliampere	mA
Minute	m	Volt	V	Kilowatt	kW
Minute alleinsteh.	min	Ohm	Ω	Megawatt	MW
Sekunde	s	Siemens	S	Mikrofarad	μF
Uhrzeit: Zeichen erhöht		Coulomb	C	Megohm	MΩ
		Joule	J	Kilovoltampere	kVA
Celsiusgrad	°	Watt	W	Amperestunde	Ah
Kalorie	cal	Farad	F	Kilowattstunde	kWh
Kilokalorie	kcal	Henry	H		

Formelzeichen.

(Lateinische Kursiv- und griechische Buchstaben. Die mit * versehenen Zeichen sind noch nicht endgültig festgesetzt.)

Länge	l
Masse	m
Zeit	t
Halbmesser	r
Durchmesser	d
Wellenlänge	λ
Fläche	F
Körperinhalt, Volumen	V
Winkel, Bogen	$\alpha, \beta, \ldots$
Voreilwinkel, Phasenverschiebung	φ
Geschwindigkeit	v
Winkelgeschwindigkeit	ω
Umlaufzahl, Drehzahl (Zahl der Umdrehungen in der Zeiteinheit)	n
Schwingungszahl in der Zeiteinheit	n
*Periodendauer	T
*Kreisfrequenz	ω
*Frequenz (bei Wechselstrom)	f
Fallbeschleunigung	g
Kraft	P
Druck (Druckkraft durch Fläche)	p
Elastizitätsmodul	E
Arbeit	A
Energie	W
Moment einer Kraft	M
Leistung	N
Wirkungsgrad	η
Trägheitsmoment	J
Zentrifugalmoment	C
Schubmodul	G
Normalspannung	σ
Spezifische Dehnung	ε
Schubspannung	τ
Schiebung (Gleitung)	γ
Spezifische Querzusammenziehung $\nu = {}^1/m$ (m Poissonsche Zahl)	ν
Reibungszahl	μ
Widerstandszahl für Flüssigkeitsströmung	ζ
Temperatur, absolute	T
Temperatur, vom Eispunkt aus	t
Temperatur, vom Eispunkt aus (mit der Zeit zusammentreffend)	ϑ
Wärmemenge	Q
Mechanisches Wärmeäquivalent	J
Entropie	S
Spezifische Wärme	c
Spezifische Wärme bei konstantem Druck	c_p
Spezifische Wärme bei konstantem Volumen	c_v
Wärmeausdehnungskoeffizient	α
Verdampfungswärme	r
Heizwert	H
Brechungsquotient	n
Hauptbrennweite	f
Lichtstärke	J
*Magnetischer Fluß	Φ
Magnetisierungsstärke	$\mathfrak{J}$
Stärke des magnetischen Feldes	$\mathfrak{H}$
Magnetische Dichte (Induktion)	$\mathfrak{B}$
Magnetische Durchlässigkeit (Permeabilität)	μ
Magnetische Aufnahmefähigkeit (Suszeptibilität)	$\varkappa$
*Spezifischer Widerstand	ϱ
*Dielektrizitätskonstante	ε
*Elektrostatische Induktion	D
Elektromotorische Kraft	E
Stromstärke, elektrische	I
Widerstand, elektrischer	R
*Leitwert	G
Elektrizitätsmenge	Q
Induktivität (Selbstinduktionskoeffizient)	L
*Gegeninduktivität	M
Elektrische Kapazität	C

Alphabetisches Register.

(Die Zahlen bedeuten Seiten.)

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.



